

Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en las quebradas Santo Domingo y La Cantuta

INFORME FINAL



Qda. Cantuta
© une.edu.pe / COE



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

EL PERÚ PRIMERO

**Caracterización del peligro
por movimientos en masa
debido a lluvias extremas
en las quebradas
Santo Domingo y La Cantuta**

INFORME FINAL





DIRECTORIO

PhD. Ken Takahashi Guevara
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Lavado Casimiro
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL SENAMHI

REVISADO POR:

PhD. Waldo Lavado Casimiro
Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
wlavado@senamhi.gob.pe

ELABORADO POR:

MSc. Henry Joel Asencios Astorayme
Especialista en hidrología e hidráulica

PERSONAL DE APOYO:

Ing. Carlos Millán Arancibia	Especialista en Hidrología
Ing. Evelin Sabino Rojas	Analista de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
Ing. Juan Carlos Breña Aliaga	Especialista en Hidrología

Lima-Perú

Mayo - 2020

CITAR COMO:

Asencios, H.; Millán C, Rojas E.; Breña J.C. (2020). Asencios, H.; Millán C, Rojas E.; Breña J.C. (2020). Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en las quebradas Santo Domingo y La Cantuta -Informe Final. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI. Dirección de hidrología -DHI. Mayo 2020.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS.....	2
2.1	General	2
2.2	Específicos	2
3	DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA Y TEMÁTICA.....	3
3.1	Descripción general de la cuenca	3
3.1.1	Ubicación geográfica del área de estudio.....	3
3.1.2	Quebrada Santo Domingo	3
3.1.3	Quebrada Cantuta	7
3.1.4	Factores topográficos que influyen en la producción de sedimentos.....	8
3.1.5	Geoformas	12
3.1.6	Mecánica de suelos	14
3.1.7	Uso y cobertura del suelo.....	16
4	ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS	16
4.1	Precipitación máxima diaria	16
4.2	Análisis de frecuencias.....	20
4.3	Desarrollo de curvas IDF	23
4.4	Tormenta de diseño	25
5	SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA	26
5.1	Resultados	30
6	SIMULACIÓN DEL TRÁNSITO DE FLUJOS DE ESCOMBROS	33
6.1	Modelo reológico.....	36
6.2	Resultados	37
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
9	ANEXOS	41
9.1	Perfil estratigráfico de las calicatas	41
9.2	Resultados de laboratorio.....	45
9.3	Panel fotográfico.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la quebrada Santo Domingo y Cantuta que drenan hacia el río Rímac en la localidad de Chosica.....	4
Figura 2. Modelo digital de superficie de la quebrada Santo Domingo y Cantuta que drenan hacia el río Rímac en la localidad de Chosica.	5
Figura 3. Curva hipsométrica de la quebrada Santo Domingo.	6
Figura 4. A) perfil longitudinal del tramo principal de la quebrada Santo Domingo; y B) Histograma de frecuencia de la pendiente longitudinal.	6
Figura 5. Curva hipsométrica de la quebrada Cantuta.	7
Figura 6. A) perfil longitudinal del tramo principal de la quebrada Cantuta; y B) Histograma de frecuencia de la pendiente longitudinal.	8
Figura 7. Distribución espacial de la pendiente (%) de la quebrada Santo Domingo y Cantuta.....	9
Figura 8. Distribución espacial del índice de transporte de agua de la quebrada Santo Domingo y Cantuta.	10
Figura 9. Distribución espacial del índice de transporte de sedimentos de la quebrada Santo Domingo y Cantuta.	11
Figura 10. Representación visual del depósito aluvial (izquierda), coluvial (centro) y espesor de sedimentos en el cauce principal (derecha) encontrado en la quebrada Santo Domingo y Cantuta..	12
Figura 11. Distribución espacial de geoformas en las quebradas Santo Domingo y Cantuta, en la localidad de Chosica.	13
Figura 12. Ubicación de calicatas aperturadas realizadas para caracterizar las propiedades mecánicas de suelos en las quebradas Santo Domingo y Cantuta.....	15
Figura 13. Serie de tiempo de la precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.	17
Figura 14. Distribución espacial del uso y cobertura del suelo en las quebradas Santo Domingo y Cantuta, en la localidad de Chosica.....	18
Figura 15. Frecuencia relativa y acumulada de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.	19
Figura 16. Autocorrelograma parcial de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.	19
Figura 17. Distribuciones probabilísticas teóricas de ajuste de la serie de precipitación máxima en 24	

horas de la estación Chosica.	22
Figura 18. Relación periodo de retorno versus magnitud de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.	22
Figura 19. Curvas IDF de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.	25
Figura 20. Perfiles de tormenta de 6 horas de duración tipo SCS-II y Curvas Huff (segundo curtil) usados en la simulación del proceso de precipitación-escorrentía.	26
Figura 21. Esquema conceptual del modelo TREX.	27
Figura 22. Representación topológica de las quebradas Santo Domingo y Cantuta (NODE).	28
Figura 23. Representación topológica de las quebradas Santo Domingo y Cantuta (LINK).	29
Figura 24. Resultados de la simulación del proceso de precipitación escorrentía usando el modelo TREX para las quebradas Santo Domingo y Cantuta.	31
Figura 25. Hidrograma de avenida para un periodo de retorno de 100 años y distintos perfiles de tormenta de la quebrada Santo Domingo usando el modelo TREX.	32
Figura 26. Hidrograma de avenida para un periodo de retorno de 100 años y distintos perfiles de tormenta de la quebrada Cantuta usando el modelo TREX.	32
Figura 27. Profundidad máxima de flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración.	34
Figura 28. Velocidad máxima de flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración.	35
Figura 29. Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros para la quebrada Santo Domingo.	37
Figura 30. Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros para la quebrada Cantuta.	38
Figura 31. Perfil estratigráfico de la calicata #1 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Santo Domingo.	41
Figura 32. Perfil estratigráfico de la calicata #2 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Santo Domingo.	42
Figura 33. Perfil estratigráfico de la calicata #1 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Cantuta.	43
Figura 34. Perfil estratigráfico de la calicata #1 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Cantuta.	44
Figura 35. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 1 (CA-1) de la quebrada Cantuta.	45

Figura 36. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 2 (CA-2) de la quebrada Cantuta.	46
Figura 37. Resultados del ensayo de determinación de peso específico para el punto 2 (CA-2) de la quebrada Cantuta.	47
Figura 38. Resultados tabulares del ensayo de corte directo para el punto 2 (CA-2) de la quebrada Cantuta.	48
Figura 39. Resultados gráficos del ensayo de corte directo para el punto 2 (CA-2) de la quebrada Cantuta.	49
Figura 40. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 1 (SD-1) de la quebrada Santo Domingo.	50
Figura 41. Resultados del ensayo de permeabilidad para el punto 1 (SD-1) de la quebrada Santo Domingo.	51
Figura 42. Resultados tabulares del ensayo de corte directo para el punto 1 (SD-1) de la quebrada Santo Domingo.	52
Figura 43. Resultados gráficos del ensayo de corte directo para el punto 1 (SD-1) de la quebrada Santo Domingo.	53
Figura 44. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 2 (SD-2) de la quebrada Santo Domingo.	54
Figura 45. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Puntos de interés con registro fotográfico.	55
Figura 46. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Puntos de control geodésico tomado en campo SD1.	55
Figura 47. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Barraje colapsado y muro de contención lateral.	56
Figura 48. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Barraje colmado de sedimentos y muro de contención lateral.	56
Figura 49. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Presa de control de sedimentos.	57
Figura 50. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil en donde se puede observar laminaciones relacionados con eventos diferentes.	57
Figura 51. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Geomalla para el control de sedimentos.	58
Figura 52. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Geomalla para el control de sedimentos.	58

- Figura 53.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Depósito de sedimentos en el cauce con predominancia de arenas.59
- Figura 54.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Basamento rocoso expuesto en el cauce y caída natural.59
- Figura 55.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata en el cauce SD2.60
- Figura 56.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata en el cauce SD1.60
- Figura 57.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Talud en afluente de margen izquierda.61
- Figura 58.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Cauce principal con elementos macrorugosos.61
- Figura 59.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Predominancia de depósitos sedimentarios coluviales.62
- Figura 60.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Elementos macro rugosos en el cauce principal.62
- Figura 61.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata CA1.63
- Figura 62.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Depósitos sedimentarios coluviales.63
- Figura 63.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Cauce con elementos marco rugosos expuestos.64
- Figura 64.** Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Cauce con elementos marco rugosos expuestos.64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros morfológicos de la quebrada Santo Domingo	3
Tabla 2. Parámetros morfológicos de la quebrada Santo Domingo	7
Tabla 3. Resumen de los ensayos de mecánica de suelos realizados en la quebrada Cantuta y Santo Domingo.	14
Tabla 4. Precipitación máxima en 24 horas registrada en la estación Chosica.....	16
Tabla 5. Índices estadísticos para establecer la estacionariedad de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.....	20
Tabla 6. Índices estadísticos de ajuste de las distribuciones teóricas de probabilidad.	21
Tabla 7. Magnitud de la precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno. .	21
Tabla 8. Valores de los parámetros de la relación IDF para la estación Chosica.....	24
Tabla 9. Parámetros para caracterizar el proceso de infiltración del agua en el suelo.....	30
Tabla 10. Parámetros para caracterizar la rugosidad superficial e intercepción de la lluvia.	30
Tabla 11. Parámetros usados en el modelo reológico para la simulación con Flo2D.	36
Tabla 12. Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros.	38
Tabla 13. Relación entre el número de Manning (n) y la simulación del flujo de escombros.	39

PRESENTACIÓN

El SENAMHI en el marco de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT) correspondiente al Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), conduce el Subcomité de Peligros Hidrometeorológicos que en coordinación con el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) viene desarrollando propuestas e instrumentos que permiten la implementación y operación de Sistemas de Alerta Temprana ante los peligros relacionados a las competencias oficiales del SENAMHI. El contexto, ha permitido el desarrollo del “Protocolo para la emisión de avisos, alertas y alarmas ante lluvias intensas y peligros asociados” (aprobado mediante R. M. N° 049-2020-PCM), además se ha dispuesto la implementación del Sistema de Alerta Temprana en la Cuenca del Río Rímac ante Lluvias Intensas y Peligros Asociados, que incluye inundaciones y activación de quebradas (SAT-RIMAC).

En ese marco el SENAMHI ha firmado convenios específicos con diferentes municipalidades y otros actores en el ámbito de la cuenca del río Rímac a fin de realizar estudios especializados para la caracterización de los peligros hidrometeorológicos que contribuirán a la Gestión del Riesgo de Desastres a nivel local.

El presente estudio denominado “Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en las quebradas Santo Domingo y la Cantuta”, ha sido realizado en el marco del Convenio de Cooperación Técnica firmado entre el SENAMHI y la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle.

El estudio, que ha sido dirigido por la Dirección de Hidrología del SENAMHI, aporta información de línea base sobre: la geomorfología y geología de las quebradas; la caracterización de los caudales líquidos y sólidos del flujo de detritos; la simulación numérica de la dinámica del flujo de agua y sedimentos así mismo la estimación de las potenciales zonas de afectación por flujo de detritos, para lo cual se ha considerado diferentes umbrales de lluvias y caudales extremos. Dicha información es relevante para la vigilancia de las lluvias intensas así como para el diseño de las obras civiles de control de flujos de escombros.

Por otro lado el estudio también ha permitido la implementación de pluviómetros en las quebradas para registrar la información de las lluvias en tiempo real y afinar los umbrales de lluvias extremas para la emisión de los **Avisos** ante posible activación de quebradas que el SENAMHI viene ejecutando operativamente con un alcance nacional.

INFORME FINAL

Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en las quebradas Santo Domingo y La Cantuta

1 INTRODUCCIÓN

El SENAMHI tiene dentro de sus funciones y competencias, a través de la Dirección de Hidrología, la vigilancia y el pronóstico hidrológico operacional. Una actividad corresponde al monitoreo de movimientos en masa por lluvias extremas en diferentes cuencas del territorio nacional. Este trabajo se realiza con la finalidad de proveer información confiable y oportuna para la alerta de eventos extremos y sus potenciales zonas de afectación.

Es en ese contexto que surge la necesidad de aumentar el conocimiento acerca de la ocurrencia del fenómeno de movimientos en masa desencadenado por lluvias extremas, a través de la caracterización de los diversos procesos físicos involucrados en las quebradas Santo Domingo y La Cantuta en la localidad de Chosica, Lima.

La falla de taludes, la erosión superficial y el flujo de escombros son riesgos geográficos típicos inducidos por las lluvias extremas en las zonas montañosas, y pueden representar un alto riesgo para la sociedad. A menudo son provocados por precipitaciones extremas y son muy sensibles a la variabilidad y el cambio climático (Lee et al., 2010).

A medida que las tormentas extremas se hacen más frecuentes, el manejo de los riesgos geológicos se vuelve crítico, tal como quedó evidenciado en el último fenómeno El Niño Costero 2017 en las quebradas que drenan a la ciudad de Chosica. Por lo tanto, es necesario desarrollar métodos apropiados para el análisis integrado de riesgos geológicos a escala regional a fin de hacer frente peligro inducido por las lluvias extremas.

El flujo de escombros es un peligro geológico catastrófico en las regiones montañosas como la localidad de Chosica. Por lo tanto, la evaluación del riesgo del flujo de detritos es muy importante para poder mitigar los efectos negativos de este tipo de fenómenos.

El análisis del peligro es la base de la evaluación del riesgo del flujo de detritos. Los procesos de erosión, transporte y deposición de un flujo de escombros se han estudiado en el pasado (Takahashi, 1981, 2014; Iverson y Ouyang, 2015). Algunos investigadores también han tenido en cuenta la variabilidad espacial de las propiedades mecánicas de los depósitos de sedimentos de las zonas afectadas por el flujo de escombros (Chen y Zhang, 2015).

Sin embargo, el proceso físico de iniciación del flujo de detritos no se considera de forma explícita en los métodos de modelización existentes. En su lugar, se requiere un hidrograma predefinido, creado sobre la base de los volúmenes estimados de escorrentía y de la fuente de sedimentos, para iniciar un análisis del flujo de escombros.

Esto lleva a grandes incertidumbres en la localización, tiempos y volúmenes de iniciación del flujo de escombros cuando se aplica al análisis regional de la ocurrencia de este tipo de eventos. Hasta la actualidad, se ha intentado de forma muy limitada simular, de forma integrada, todo el proceso, desde el inicio hasta el movimiento y deposición del flujo de escombros. Dado que el flujo de escombros implica una escala regional, se debería implementar un modelo integrado para simular todo el proceso de transporte de sedimentos desde el inicio hasta la deposición.

La interacción de peligros múltiples y el efecto en cascada son otra preocupación cuando ocurren eventos meteorológicos extremos. Diversos tipos de peligros pueden ser inducidos por una tormenta. Por ejemplo, fallas de taludes, erosión superficial y flujos de escombros (Zhang y Zhang, 2017).

Un peligro puede ser la causa de otro. Dicho de otra forma, las lluvias podrían desencadenar fallas en los taludes que a su vez generaría flujo de escombros. Diferentes tipos de peligros también pueden interactuar entre sí y amplificarse entre ellos. La interacción y el efecto en cascada de los peligros múltiples pueden intensificar la magnitud y el área de impacto de cada uno de ellos.

La simulación de los procesos completos de posibles amenazas y sus interacciones a escala regional puede ser una herramienta poderosa para ayudar a identificar las amenazas probables, sus áreas de impacto potencial y los elementos en riesgo.

Se han desarrollado algunos modelos numéricos para simular el movimiento del flujo de detritos teniendo en cuenta la erosión superficial (O'Brien et al., 1993; Chen y Zhang, 2015; Quan Luna et al., 2016).

Sin embargo, a menudo la falla de taludes es simulada por separado, y no se considera la modelización física del transporte del material desprendido ni el proceso de erosión superficial. Existen muy pocas investigaciones que intentan incorporar múltiples amenazas inducidas por la lluvia para analizar las interacciones entre amenazas. Por lo tanto, el desarrollo de un modelo integrado para simular procesos e interacciones de peligros múltiples es de gran importancia teórica y práctica.

Las fallas en los taludes y los flujos de escombros se encuentran entre los riesgos geográficos más frecuentes y perjudiciales inducidos por las lluvias extremas bajo las circunstancias de la variabilidad y cambio climático y representan una amenaza para la vida y la propiedad, directa o indirectamente.

Es sumamente importante anticipar y mitigar los riesgos potenciales a largo plazo asociados con futuros eventos extremos. Existen muchos métodos para mitigar el riesgo de peligros geológicos, tales como medidas de ingeniería y soluciones basadas en la naturaleza. Entre ellas, la vegetación es una forma natural y respetuosa con el medio ambiente. Otra alternativa que ha mostrado una atenuación importante en los efectos negativos corresponde a las geomallas. En todo caso, aumentar el conocimiento de cada uno de los peligros geológicos desencadenados por lluvias extremas y su interrelación es de suma importancia para una eficiente gestión de riesgo de desastres.

2 OBJETIVOS

2.1 General

Caracterizar las variables físicas que describen el fenómeno de movimientos en masa debido a lluvias extremas en las quebradas Santo Domingo y La Cantuta.

2.2 Específicos

- i. Realizar la caracterización geomorfológica-geológica y describir los procesos de geodinámica externa de las microcuencas de estudio.
- ii. Estimar los hidrogramas líquidos y sólidos producto de la ocurrencia de tormentas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno: 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

- iii. Estimar la dinámica del flujo de agua y sedimentos asociada a la ocurrencia de las tormentas de diseño preestablecidas.

3 DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA Y TEMÁTICA

3.1 Descripción general de la cuenca

3.1.1 Ubicación geográfica del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte media de la cuenca del río Rímac. Comprende dos afluentes denominados quebrada Santo Domingo y Cantuta que drenan hacia el río Rímac, tal como se puede observar en la Figura 1.

La quebrada Cantuta se encuentra contigua a las quebradas California (al oeste), Santo Domingo y La Ronda (al este). Se accede por la margen izquierda del río Rímac, directamente desde Chosica o también desde el ingreso por Puente Los Ángeles. Parte del abanico y cauce de esta quebrada está ocupado por el Club Regatas (instalaciones, residencias, piscinas, bungalós y zona de bosque) y terrenos de cultivo en la parte baja.

La quebrada Santo Domingo se encuentra contigua a las quebradas Dos Barrios y La Ronda (al este), Cantuta (al oeste). Se accede por la margen izquierda del río Rímac, directamente desde Chosica o también desde el ingreso por Puente Los Ángeles. Se encuentra frente a la localidad de Chosica. Gran parte del abanico antiguo y cauce de esta quebrada está ocupado por la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle La Cantuta (instalaciones, pabellones, zonas agrícolas y de bosques ocupadas por las áreas de estudios agrícolas) y el sector urbano-marginal de Santo Domingo (principalmente en la margen derecha), con viviendas de material noble y también rústicas o precarias hacia las partes superiores.

3.1.2 Quebrada Santo Domingo

La quebrada Santo Domingo, hasta el punto de interés (desembocadura en el río Rímac), presenta un área de drenaje de 3,8 Km², un perímetro de 12,3 Km y una diferencia altitudinal de 1011,5 m, según se puede observar en la Tabla 1 y Figura 1.

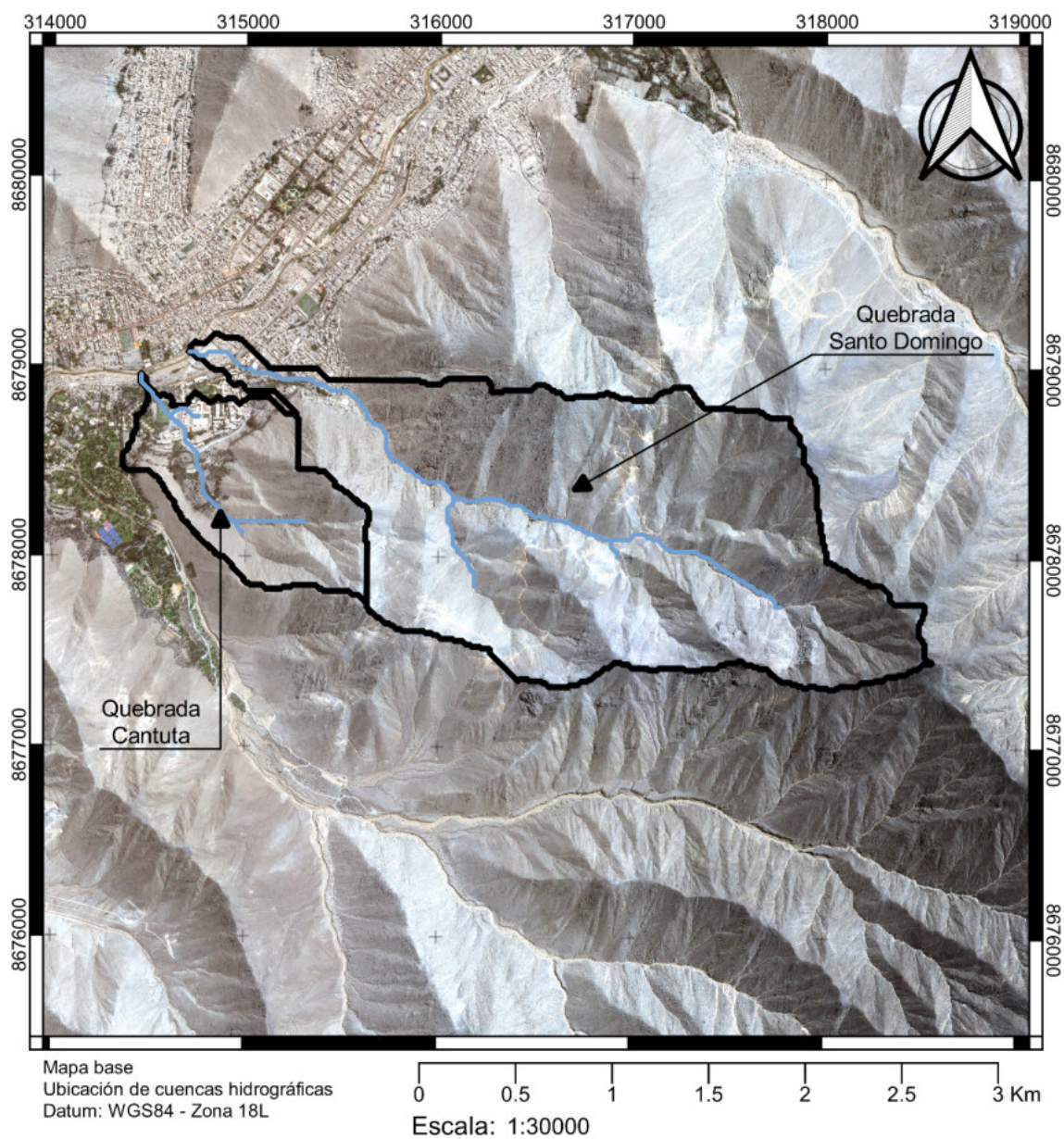
Tabla 1. Parámetros morfológicos de la quebrada Santo Domingo.

Parámetros generales			Parámetros de forma			Parámetros de Relieve			Índice hipsométrico	
A (Km ²)	P (Km)	DA (m)	Cg	Lre (Km)	Ire (Km)	L (Km)	j (%)	J (%)	Altitudinal (IHA)	Areal (IHa)
3,80	12,30	1111,50	1,78	5,51	0,69	3,80	15,28	66,80	1,13	0,53

Fuente: Elaboración propia

Para obtener los parámetros morfológicos y diferentes productos topográficos se ha usado el Modelo Digital de Superficie (DSM) que se muestra en la Figura 2. Mayor información del producto global (ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)") se puede encontrar en <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.

Respecto de sus parámetros de forma, la quebrada Santo Domingo presenta un índice de Gravelius de 1,8 y longitudes del rectángulo equivalente de 5,5 y 0,7 Km (lado mayor y menor). Estos valores sugieren que nos encontramos en presencia de una cuenca semi-alargada en donde se espera que la respuesta hidrológica no sea inmediata.



Leyenda

- Red de drenaje
- Cuenca

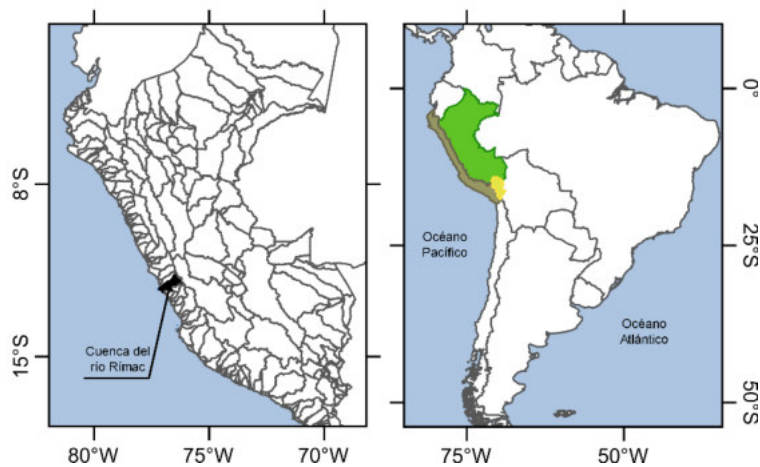


Figura 1. Ubicación de la quebrada Santo Domingo y Cantuta que drenan hacia el río Rímac en la localidad de Chosica.

Fuente: Elaboración propia

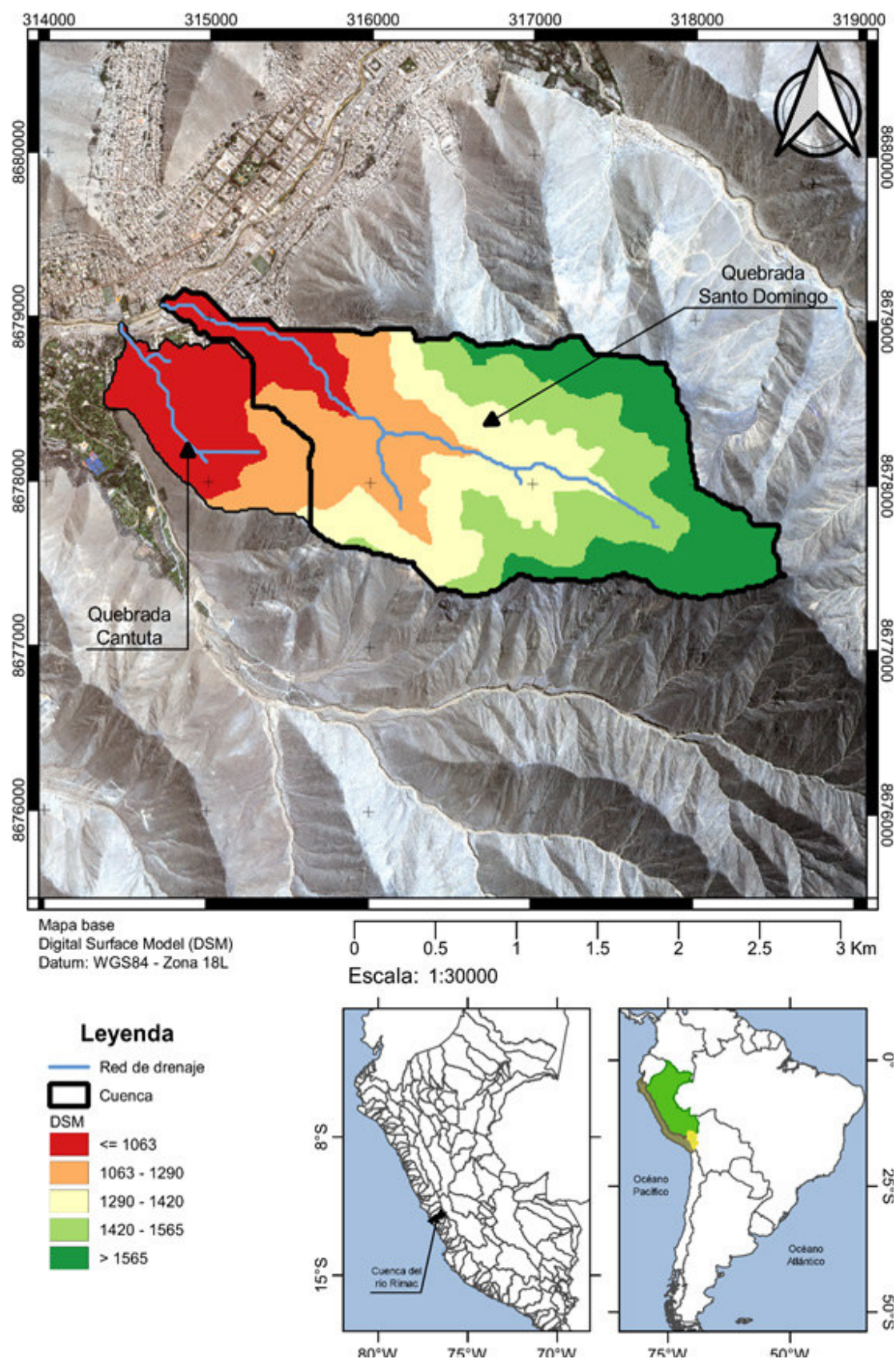


Figura 2. Modelo digital de superficie de la quebrada Santo Domingo y Cantuta que drenan hacia el río Rímac en la localidad de Chosica.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los parámetros de relieve, se ha encontrado que la longitud del cauce principal es de 3,8 Km, una pendiente media de 15,3%, y una pendiente media de ladera de 66,8%. Estas características corresponden a un río de montaña o pie de monte en donde probablemente se presente una gran capacidad de transporte de sedimentos en épocas de avenidas, y la respuesta hidrológica se produzca en lapsos de tiempo menores debido a la mayor longitud de cauce (ver Tabla 1 y Figura 3 y 4).

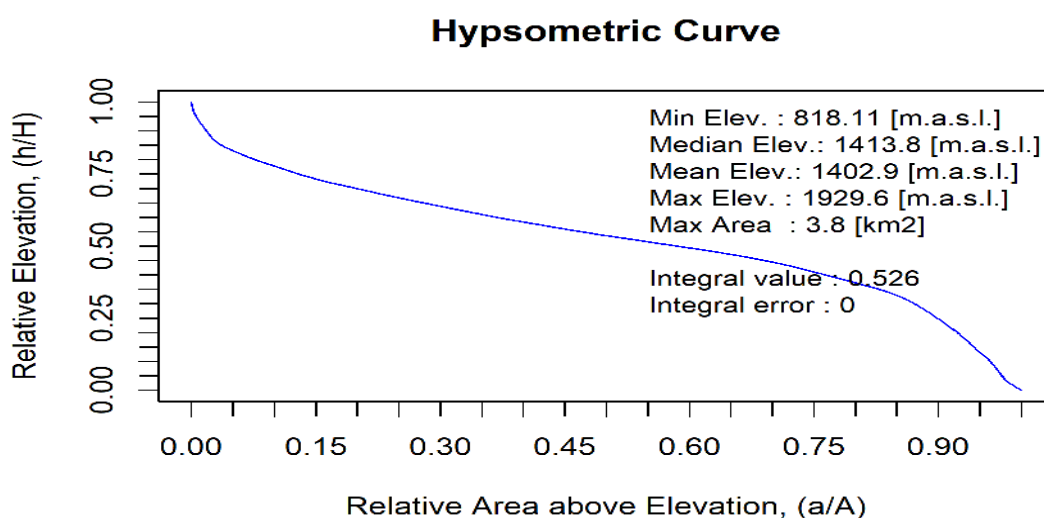


Figura 3. Curva hipsométrica de la quebrada Santo Domingo.

Fuente: Elaboración propia

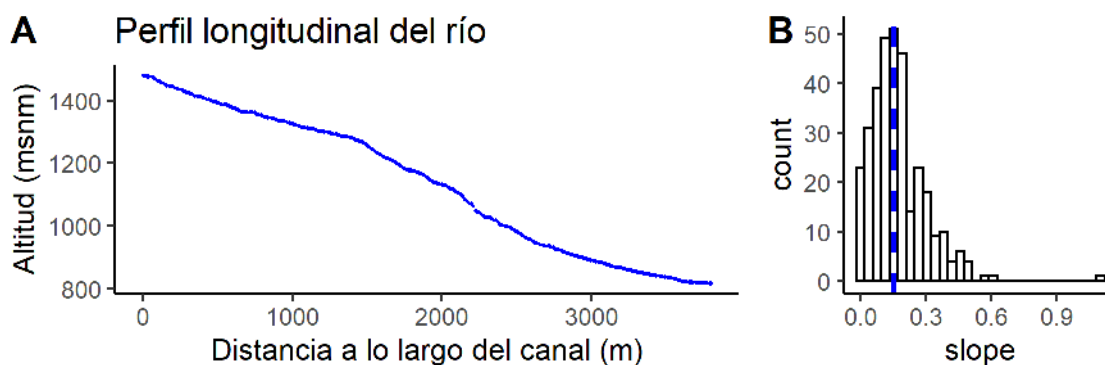


Figura 4. A) perfil longitudinal del tramo principal de la quebrada Santo Domingo; y B) Histograma de frecuencia de la pendiente longitudinal.

Fuente: Elaboración propia

Considerando la curva hipsométrica de la cuenca, que representa el área drenaje con relación a su altitud (Figura 3), se ha encontrado que más del 80% del área de drenaje se encuentra por encima de los 1318,3 msnm. Asimismo, se ha determinado que el índice hipsométrico altitudinal (areal) es de 1,13 (0,53), lo cual nos permite sugerir que nos encontramos frente una cuenca del tipo erosiva, con una red de drenaje sometida a fuertes tensiones de corte, en donde probablemente se presente una alta capacidad de carga, principalmente en épocas de avenidas. Asimismo, esta subcuenca podría estar caracterizada por procesos geomorfológicos de erosión en ladera y cárcavas, así como erosión en el cauce y bancos.

3.1.3 Quebrada Cantuta

La quebrada Cantuta, hasta el punto de interés (desembocadura en el río Rímac), presenta un área de drenaje de 0,8 Km², un perímetro de 6,6 Km y una diferencia altitudinal de 507,9 m, según se puede observar en la Tabla 2 y Figura 1.

Tabla 2. Parámetros morfológicos de la quebrada Santo Domingo

Parámetros generales			Parámetros de forma			Parámetros de Relieve			Índice hipsométrico	
A (Km ²)	P (Km)	DA (m)	Cg	Lre (Km)	Ire (Km)	L (Km)	j (%)	J (%)	Altitudinal (IHA)	Areal (IHa)
0,80	6,60	507,90	2,08	3,06	0,26	0,76	13,05	55,22	0,45	0,33

Fuente: Elaboración propia

Respecto de sus parámetros de forma, presenta un índice de Gravelius de 2,1 y longitudes del rectángulo equivalente de 3,1 y 0,3 Km (lado mayor y menor). Estos valores sugieren que nos encontramos en presencia de una cuenca semi-alargada en donde se espera que la respuesta hidrológica no sea inmediata.

En cuanto a los parámetros de relieve, se ha encontrado que la longitud del cauce principal es de 0,8 Km, una pendiente media de 13,1%, y una pendiente media de ladera de 55,2%. Estas características corresponden a un río de montaña o pie de monte en donde probablemente se presente una gran capacidad de transporte de sedimentos en épocas de avenidas, y la respuesta hidrológica se produzca en lapsos de tiempo menores debido a la mayor longitud de cauce (ver Tabla 2 y Figura 5 y 6).

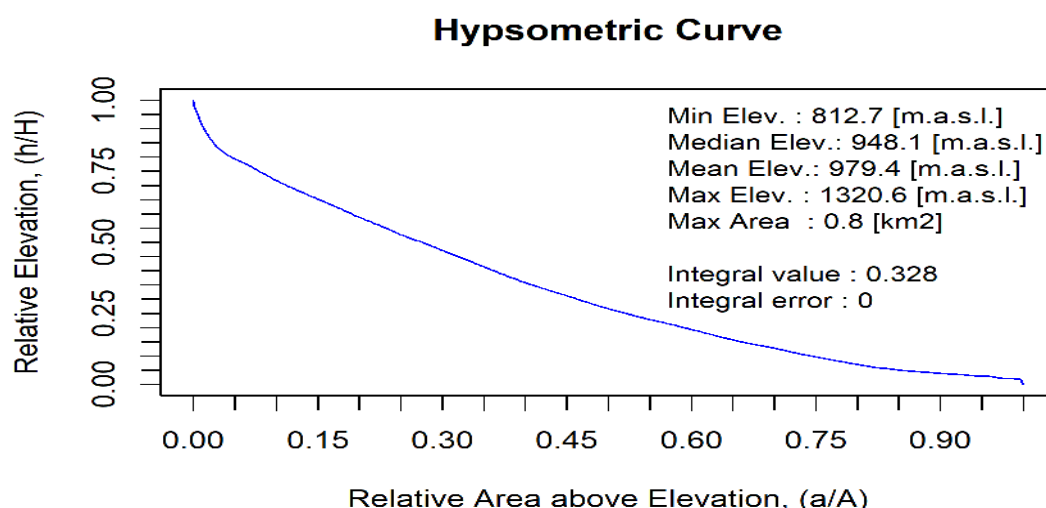


Figura 5. Curva hipsométrica de la quebrada Cantuta.

Fuente: Elaboración propia

Considerando la curva hipsométrica de la cuenca, que representa el área drenaje con relación a su altitud (Figura 4), se ha encontrado que más del 75% del área de drenaje se encuentra por encima de los 888,9 msnm. Asimismo, se ha determinado que el índice hipsométrico altitudinal (areal) es de 0,45 (0,34), lo cual nos permite sugerir que nos encontramos frente a una cuenca del tipo erosiva, con una red de drenaje sometida a fuertes tensiones de corte, en donde probablemente se presente una alta capacidad de carga, principalmente en épocas de avenidas. Asimismo, esta subcuenca podría estar caracterizada por procesos geomorfológicos de erosión en ladera y cárcavas, así erosión en cauce y bancos.

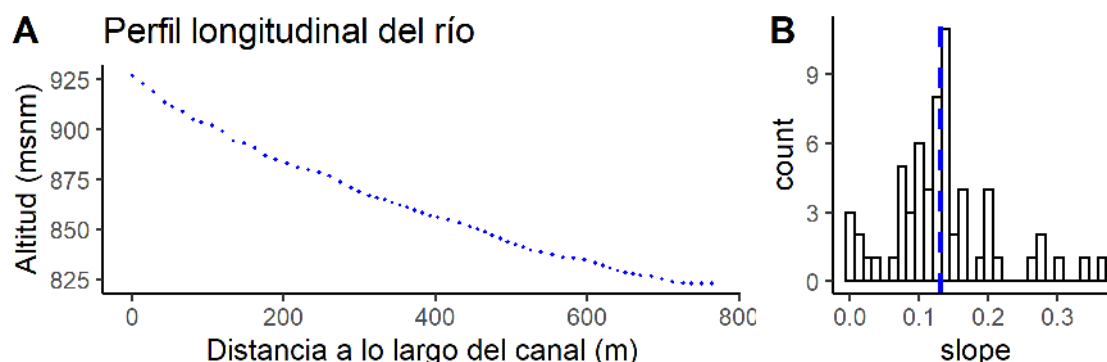


Figura 6. A) perfil longitudinal del tramo principal de la quebrada Cantuta; y B) Histograma de frecuencia de la pendiente longitudinal.

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Factores topográficos que influyen en la producción de sedimentos

Tal como se puede observar en la Figura 7, las quebradas en estudio presentan una alta variabilidad espacial de pendientes tanto en ladera como en la red de drenaje. Se resalta una predominancia de bajas pendientes cerca del cono aluvial, donde se encuentra asentada la población, y donde probablemente se depositen los sedimentos generados en las quebradas.

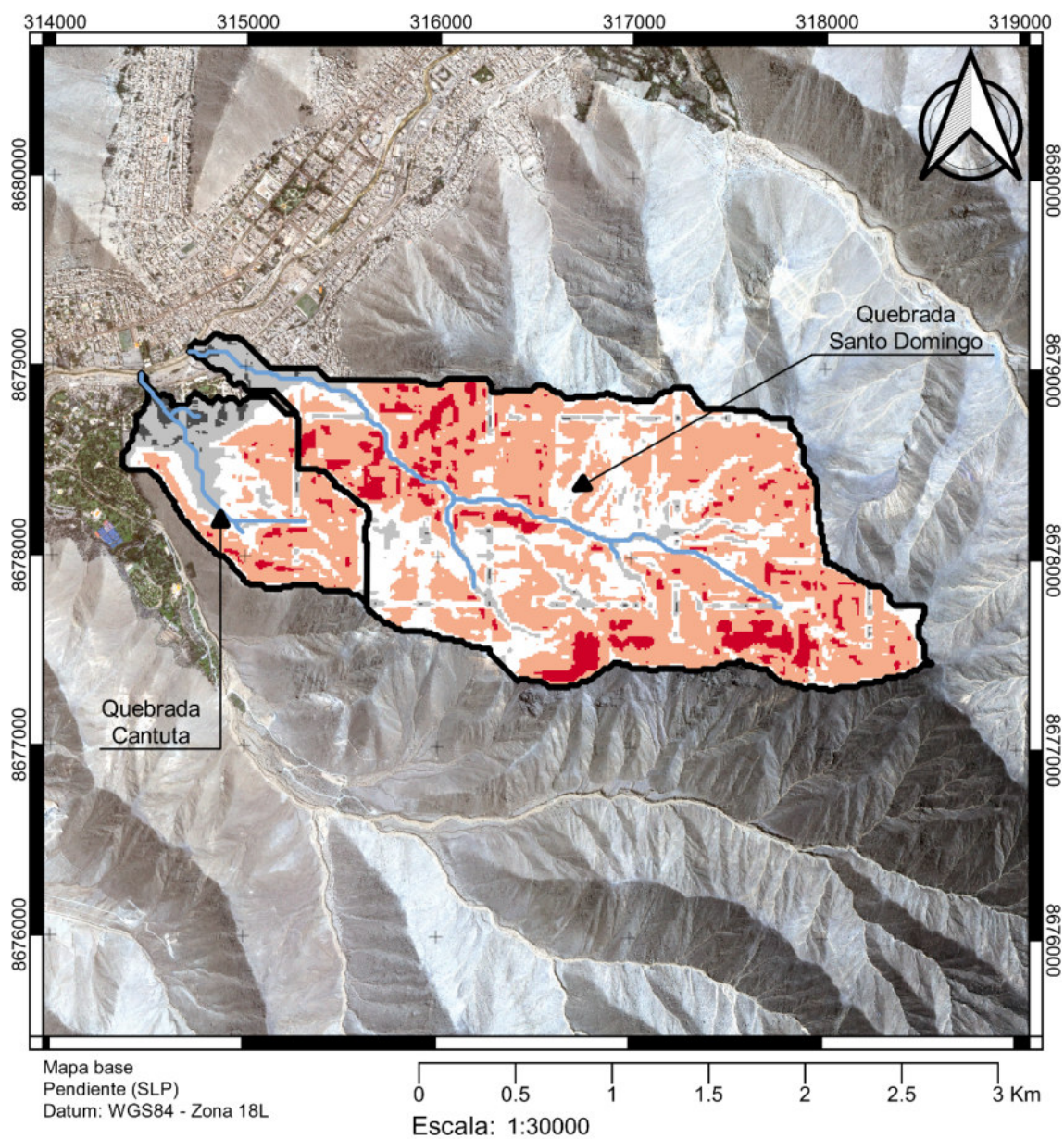
Asimismo, la pendiente longitudinal del cauce principal y su distribución de frecuencias (Figura 3 y 6), nos permite sugerir que nos encontramos frente a quebradas jóvenes en donde no se ha alcanzado un equilibrio geomorfológico y que probablemente, cuando ocurran eventos hidrometeorológicos extremos, se produzca una importante producción de sedimentos.

Del mismo modo, es razonable pensar que la red de drenaje contenga elementos macrorugosos de gran tamaño y una granulometría mal graduada. Esto con la finalidad de compensar la alta energía generada cuando ocurre el flujo de agua y sedimentos debido a lluvias extremas.








Si observamos la red de drenaje, representada en el mapa base de la Figura 1, se podría afirmar que uno de los procesos más importantes para la producción de sedimentos en las quebradas es la erosión en cárcavas. Lo anterior se reafirma si observamos las Figuras 8 y 9; es decir, la distribución espacial del índice de poder erosivo del flujo y transporte de sedimentos, respectivamente.

Según la Figura 8, se confirma que cuando se activan las quebradas por lluvias extremas, el factor topográfico juega un papel predominante, generando que uno de los principales modos de producción de sedimentos sea la erosión en cárcavas (ver la clase de color azul en el mapa). Es decir, de existir depósitos sedimentarios disponibles en las quebradas, la acción del agua —a través de la escorrentía superficial— generaría que la configuración espacial de las quebradas sea como se muestra en el referido mapa.

Lo anterior está limitado a la disponibilidad espacial y tamaño de los sedimentos en la cuenca, así como la exposición del basamento rocoso.



Leyenda

-  Red de drenaje
-  Cuenca
- SLP (%)
 -  ≤ 5
 -  5 - 30
 -  30 - 60
 -  60 - 90
 -  > 90

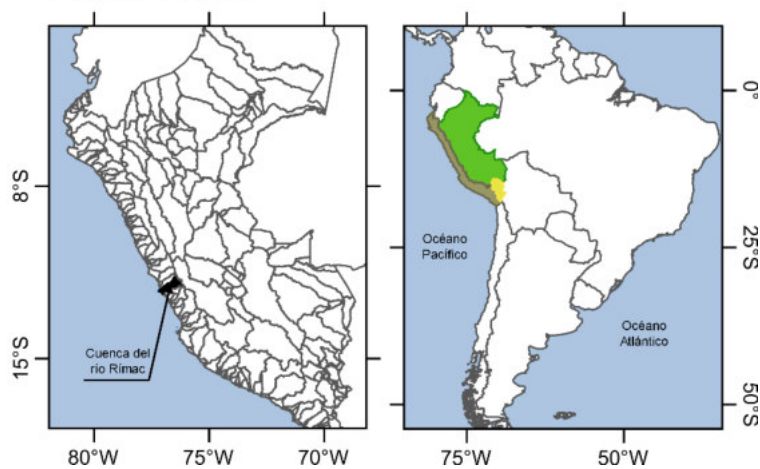


Figura 7. Distribución espacial de la pendiente (%) de la quebrada Santo Domingo y Cantuta.

Fuente: Elaboración propia

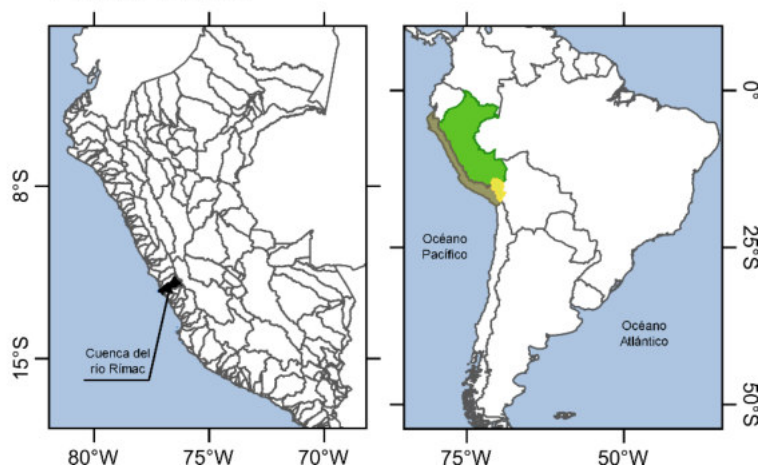
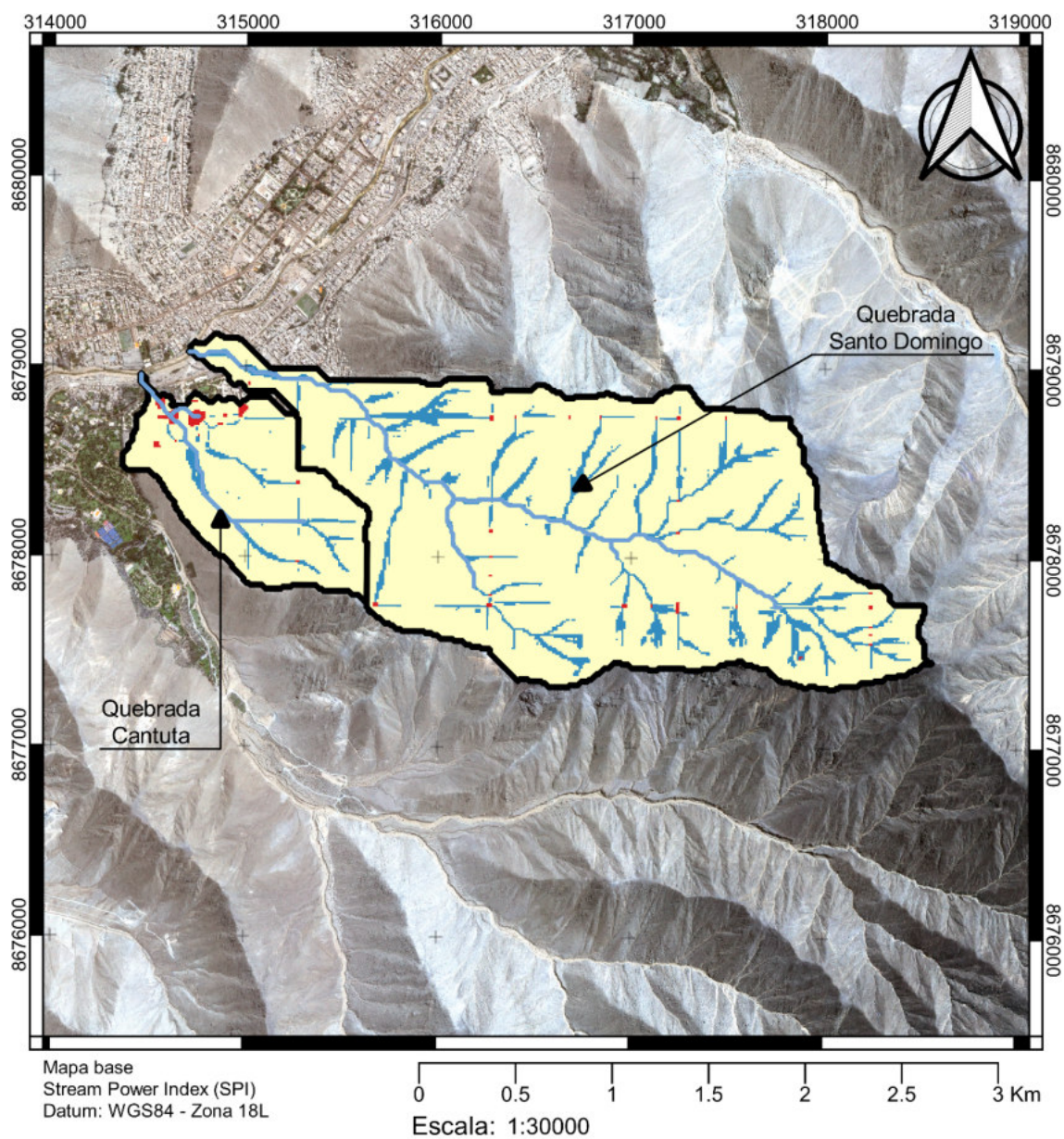
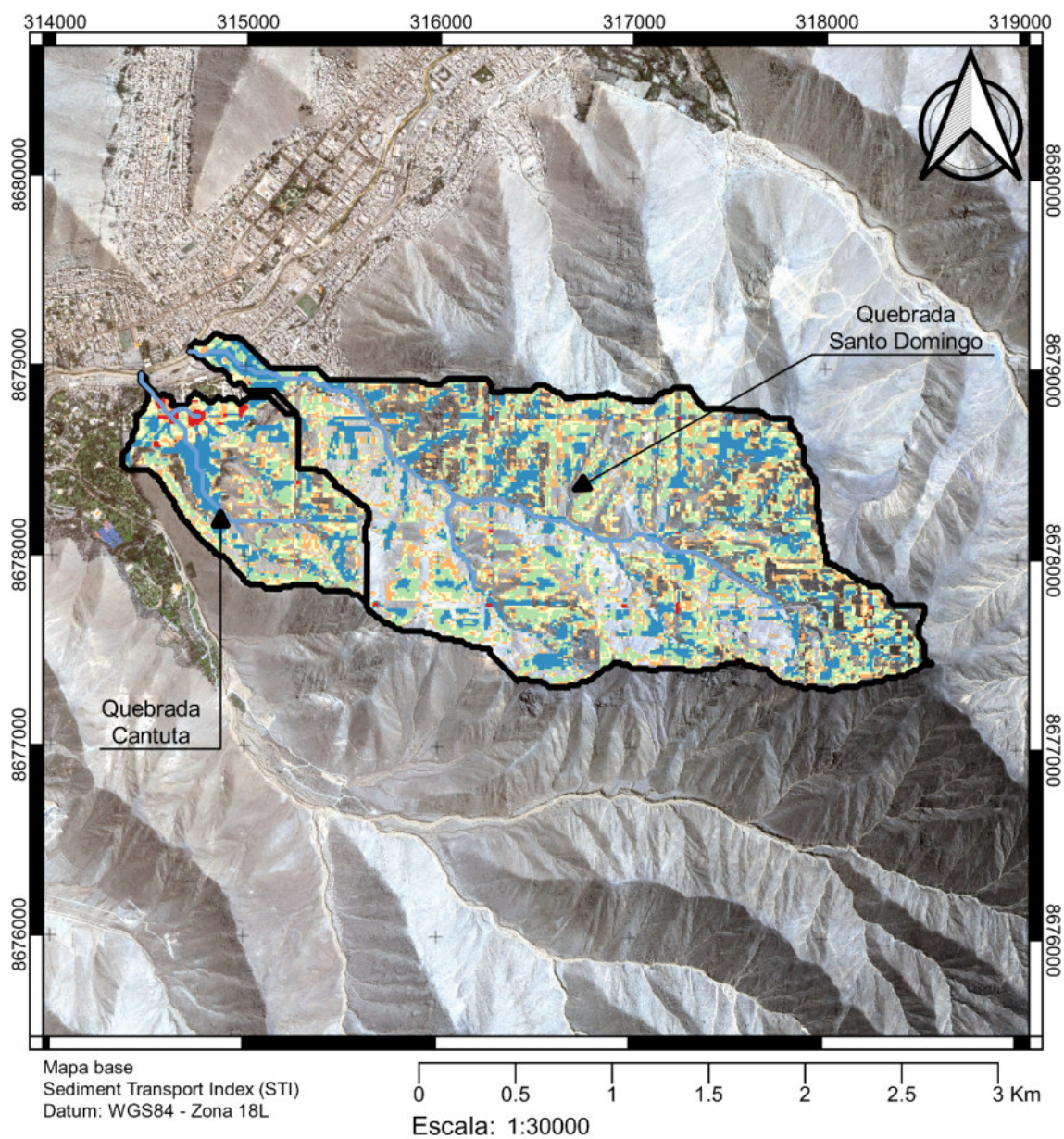









Figura 8. Distribución espacial del índice de transporte de agua de la quebrada Santo Domingo y Cantuta.

Fuente: Elaboración propia



Leyenda

-  Red de drenaje
-  Cuenca
- STI
-  ≤ 0
-  0 - 0.5
-  0.5 - 1.0
-  1.0 - 2.0
-  > 2.0

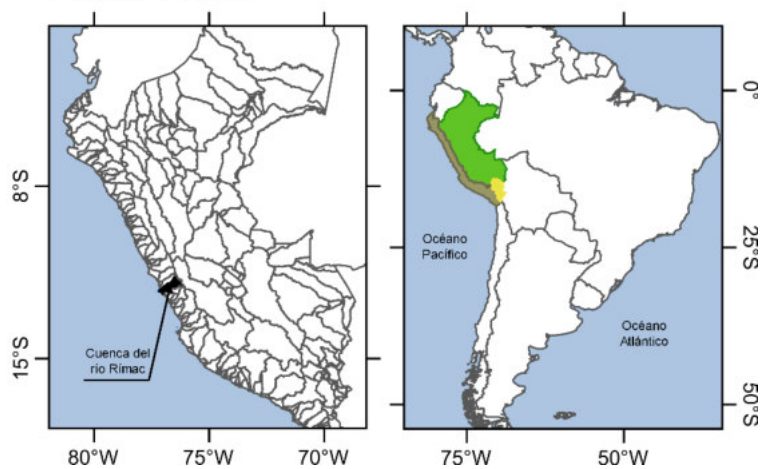


Figura 9. Distribución espacial del índice de transporte de sedimentos de la quebrada Santo Domingo y Cantuta.
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al patón espacial del índice de transporte de sedimentos, mostrado en la Figura 9, se puede sugerir que otro mecanismo importante para la producción de sedimentos en las quebradas en estudio corresponde a la erosión superficial. Es decir, provocado por la acción del flujo de agua sobre la ladera.

Finalmente, otro mecanismo importante corresponde a la erosión fluvial y bancos de la red de drenaje.

3.1.5 Geoformas

Para caracterizar las geoformas se ha usado el producto Global ALOS Landforms (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CSP_ERGo_1_0_Global_ALOS_landforms) que está basado en el producto que corresponde al DSM usado en la presente consultoría.

Según se puede observar en las Figuras 10 y 11, se ha encontrado 5 clases de geoformas: valle, pendientes bajas, pendientes altas, picos y divisorias.

Cada geoforma corresponde a una unidad simple y característica del terreno que forma parte de la superficie terrestre. Es importante resaltar la importancia de este factor debido a que representa la evolución del paisaje debido a los agentes físicos como la acción del agua sobre la superficie a escala local.

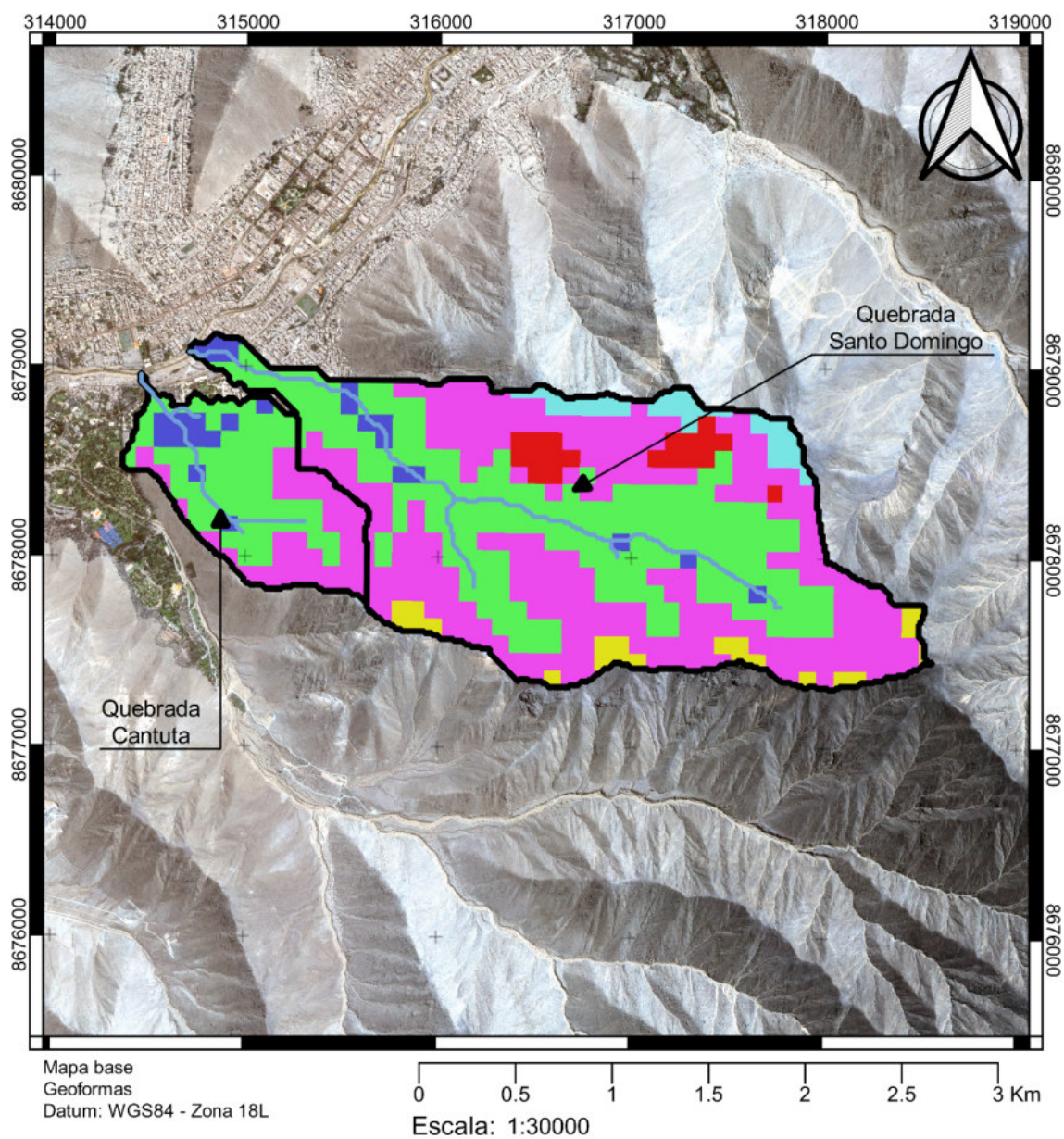
En específico, el valle y las zonas de pendientes bajas (terrazas y conos aluviales) están constituidos por un depósito sedimentario aluvial reciente y antiguo que presentan arenas limosas y grava de diferente tamaño y pueden alcanzar un espesor entre 0,5 a 1,0 m. Se puede considerar como una de las fuentes más importantes de sedimentos en las quebradas en estudio.

Las demás geoformas (zonas de alta pendiente, divisoria y picos) están constituidas por un depósito sedimentario coluvial y eluvial (roca intrusiva meteorizada). Se encuentra en laderas recubriendo el macizo rocoso y podrían tener un espesor aproximado de 0,3 a 0,5 m.



Figura 10. Representación visual del depósito aluvial (izquierda), coluvial (centro) y espesor de sedimentos en el cauce principal (derecha) encontrado en la quebrada Santo Domingo y Cantuta.

Fuente: Elaboración propia



- Leyenda**
-  Red de drenaje
 -  Cuenca
 - Geoforma**
 -  Valley
 -  Lower slope (warm)
 -  Upper slope (warm)
 -  Mountain/divide
 -  Upper slope
 -  Peak/ridge (warm)

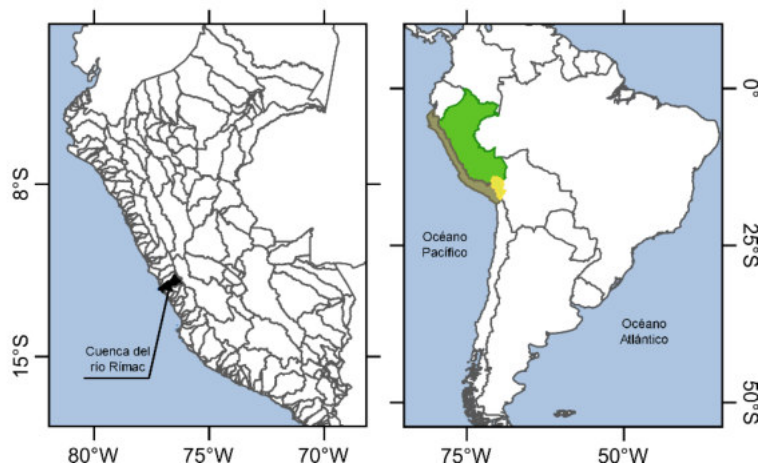


Figura 11. Distribución espacial de geoformas en las quebradas Santo Domingo y Cantuta, en la localidad de Chosica.
Fuente: Elaboración propia

3.1.6 Mecánica de suelos

Como se puede observar en la Figura 12, se han realizado cuatro (04) calicatas aperturadas en las quebradas Santo Domingo y Cantuta. Todas ellas en el depósito sedimentario aluvial que corresponde a la principal fuente de sedimentos.

En la Tabla 3 se puede observar el resumen de todos los ensayos de laboratorio realizados. Se resalta que en todos los casos la profundidad máxima alcanzada fue de 1,2 m y que la matriz de sedimentos está constituida preferentemente por arenas. Asimismo, el porcentaje de finos (limos) es menor a 2%, que está estrechamente relacionado con la nula cohesión entre partículas en los depósitos sedimentarios analizados.

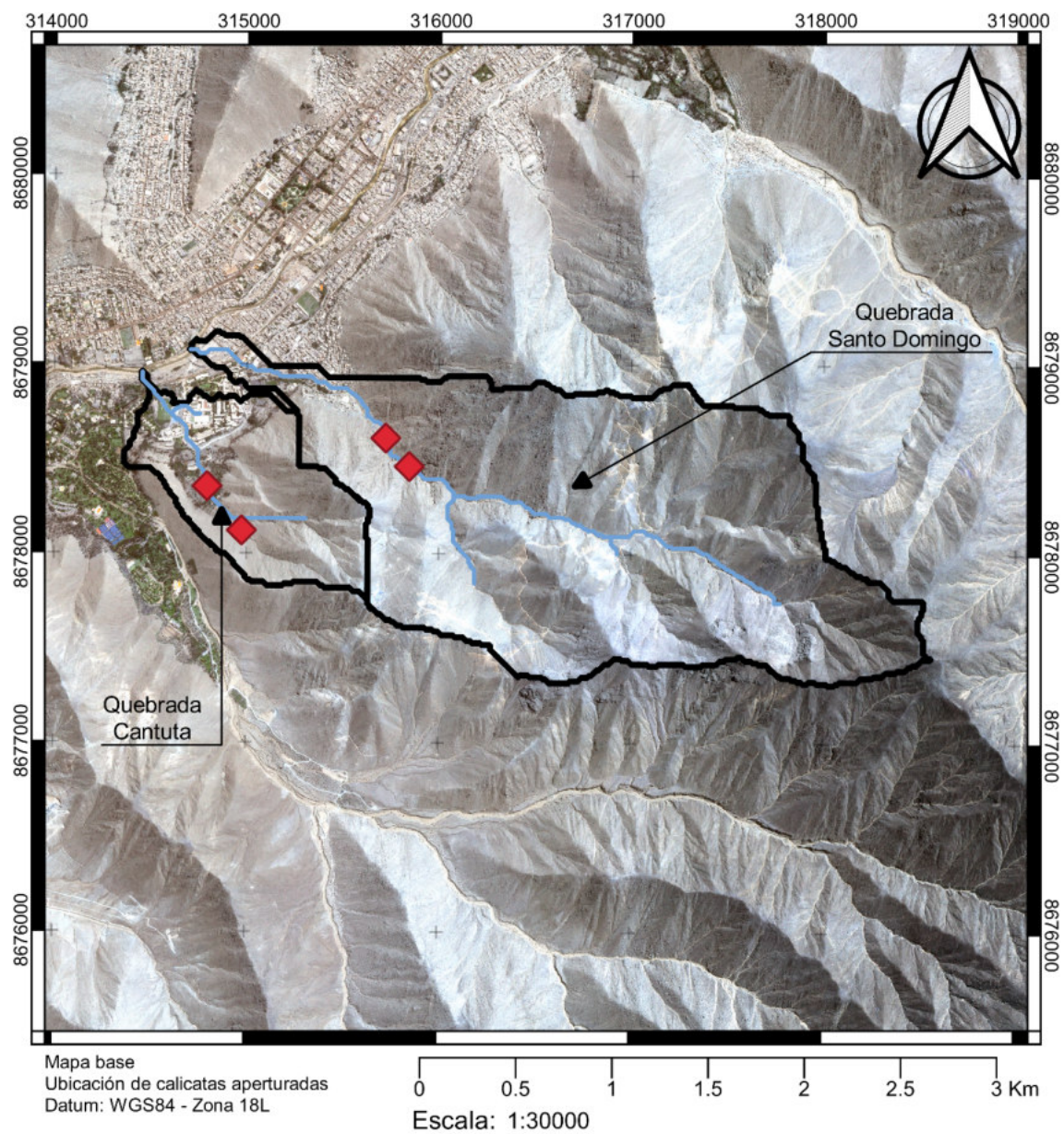
Se ha encontrado la presencia de guijarros y cantos subredondeado en el conglomerado de matriz de arenas. Asimismo, se ha evidenciado de forma visual (en el reconocimiento de campo) la presencia de cemento superficial que modifica las propiedades físicas de la superficie como la infiltración del agua en el suelo. Probablemente nos encontremos frente a la presencia de carbonatos. Para asegurar lo anterior, se debería de realizar ensayos de mineralogía de las rocas sedimentarias de las quebradas en análisis.

Esta afirmación tiene incidencia directa sobre el proceso de precipitación-escurrimiento de las quebradas en análisis, debido a que a pesar de haber obtenido una alta permeabilidad que corresponde a la matriz de arenas, se debe considerar una muy baja o nula infiltración para poder representar adecuadamente los efectos de la presencia de cementos sobre la precipitación efectiva que produce el escurrimiento superficial y el proceso erosión.

Además, se debe mencionar que la presencia de cemento tiene influencia sobre la resistencia de la superficie del terreno a la erosión (salpicadura, laminar y surcos). Esto no se podrá comprobar en esta consultoría porque corresponde a un proyecto de investigación aplicada. Sin embargo, se van a elegir valores de erodabilidad apropiados para considerar este efecto.

Tabla 3. Resumen de los ensayos de mecánica de suelos realizados en la quebrada Cantuta y Santo Domingo.

Variable	Quebrada Cantuta		Quebrada Santo Domingo	
	CA-1	CA-2	SD-1	SD-2
Profundidad (m)	0,65	1,2	1,05	0,95
Grava (%)	62	17	29	13
Arena (%)	37	81	69	86
Finos (%)	1	2	2	1
d ₉₅ (mm)	67,7	19,1	41,7	9,0
d ₉₀ (mm)	59,3	9,5	31,8	6,3
d ₅₀ (mm)	8,6	1,5	1,5	1,4
SUCS	GP con grava	SP con grava	SP con grava	SP
Permeabilidad (m ¹ s ⁻¹)	-	-	1,02E-03	
Humedad (%)	1,2	1,27	1,25	1,3
Densidad seca (gr ¹ cm ⁻³)	1,52	1,52	1,51	1,49
Gravedad específica (Gs)	-	2,671	-	-
Ángulo de fricción interna (°)	-	32,04	32,11	-
Cohesión aparente (Kg ¹ cm ⁻²)	-	0	0	-
Límite líquido (%)	-	-	-	-
Límite plástico (%)	-	-	-	-
Índice plástico (%)	-	-	-	-



- Leyenda**
-  Red de drenaje
 -  Cuenca
 -  Calicatas

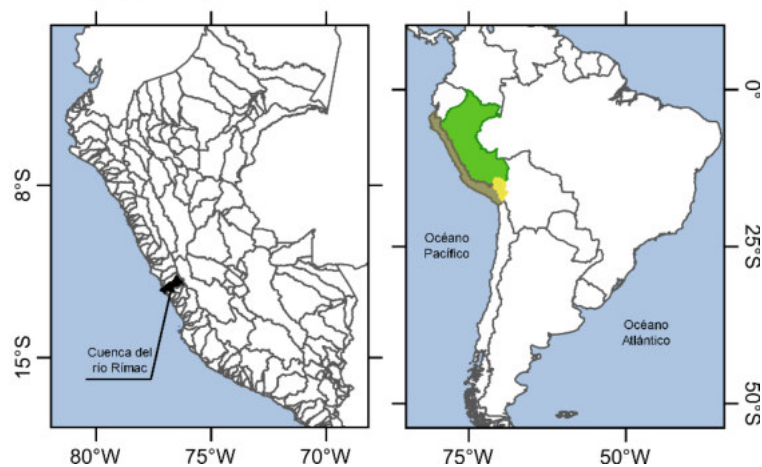


Figura 12. Ubicación de calicatas aperturadas realizadas para caracterizar las propiedades mecánicas de suelos en las quebradas Santo Domingo y Cantuta.

Fuente: Elaboración propia

3.1.7 Uso y cobertura del suelo

El mapa de uso y cobertura de suelos se puede observar en la Figura 14. Se ha encontrado 3 clases: pradera, zona urbana y suelo desnudo, de los que mayor cobertura presenta es el último. Mayor información se puede encontrar en el siguiente enlace: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3243509>.

Esta información es muy importante para representar la rugosidad superficial e interceptación de lluvia en el proceso de precipitación-escorrentía.

4 ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS

4.1 Precipitación máxima diaria

De las estaciones pluviométricas con las que se cuenta con información de precipitación máxima en 24 horas, se estableció que la más representativa es la estación Chosica, por presentar una longitud de 30 años de datos para poder realizar el análisis de frecuencias respectivo.

En la Tabla 4 y Figura 13 se muestra la información de precipitación máxima en 24 horas del registro de la estación Chosica. En la Figura 15 se muestra la frecuencia relativa y acumulada de la serie de tiempo de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.

Tabla 4. Precipitación máxima en 24 horas registrada en la estación Chosica.

1990	3,20	2005	1,20
1991	3,70	2006	5,60
1992	2,30	2007	7,70
1993	2,40	2008	4,00
1994	16,00	2009	8,00
1995	3,00	2010	0,80
1996	5,80	2011	5,70
1997	0,50	2012	37,00
1998	6,50	2013	2,30
1999	6,50	2014	6,20
2000	6,00	2015	18,30
2001	5,20	2016	5,30
2002	30,70	2017	19,50
2003	2,80	2018	9,40
2004	1,60	2019	2,00

Fuente: Senamhi.

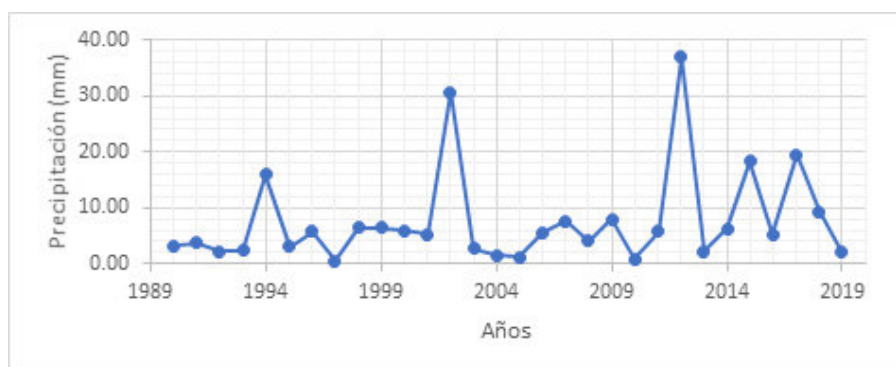
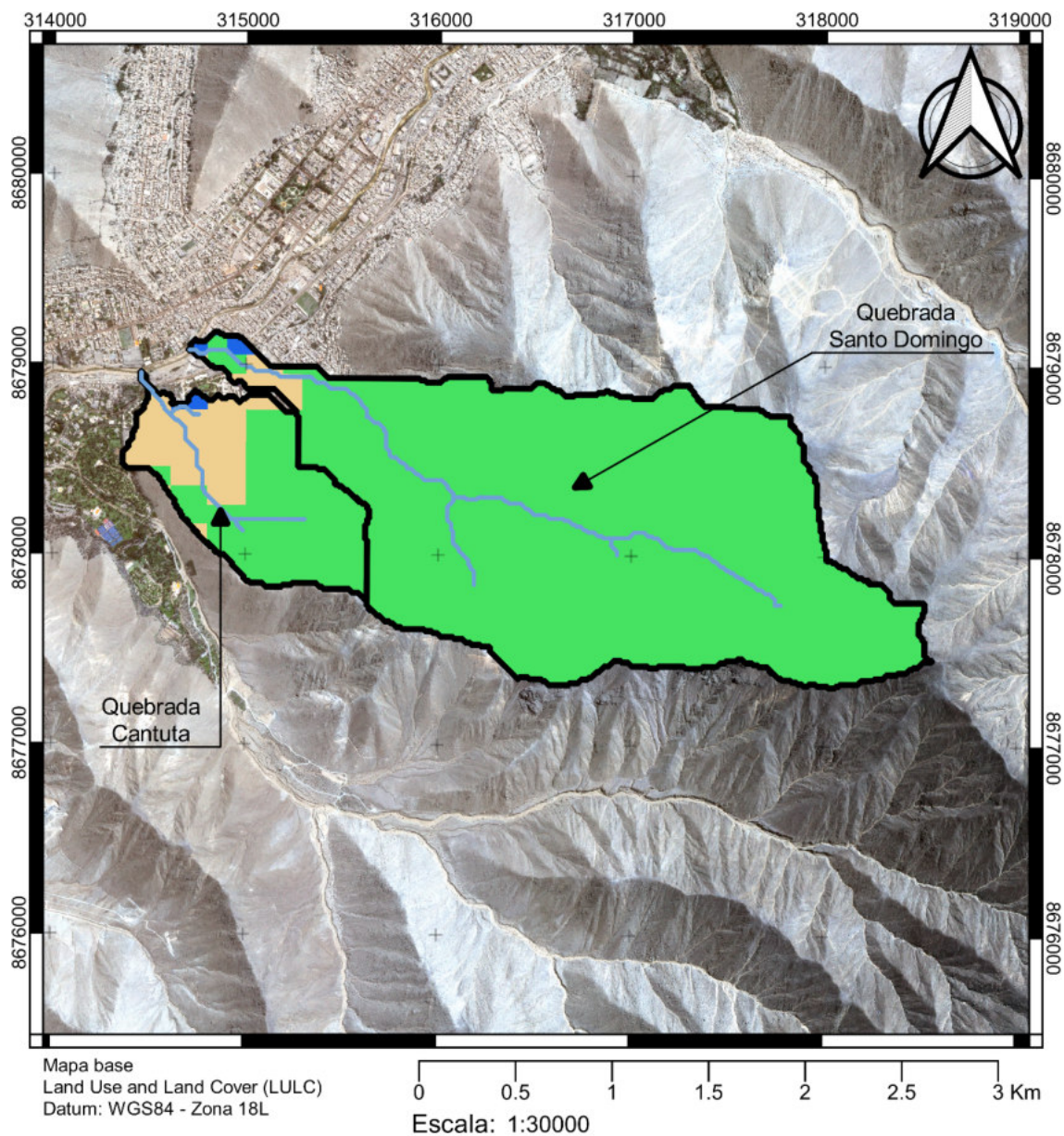


Figura 13. Serie de tiempo de la precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.
Fuente: Senamhi.



Leyenda

- Red de drenaje
- Cuenca
- LULC
 - Pradera
 - Zona urbana
 - Suelo desnudo
 - Otros

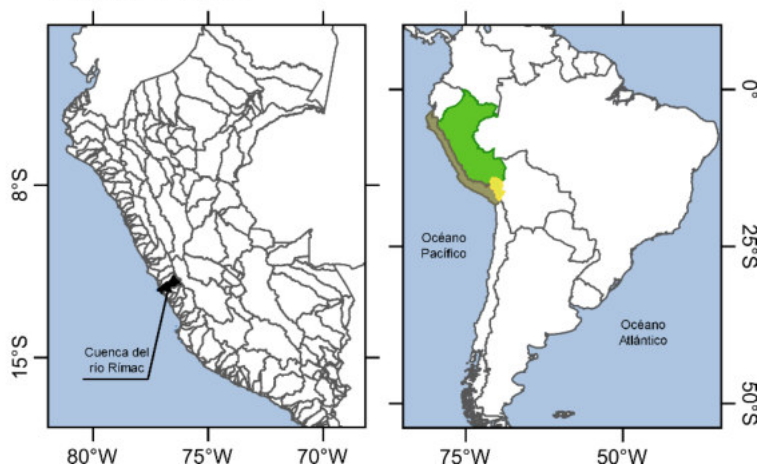


Figura 14. Distribución espacial del uso y cobertura del suelo en las quebradas Santo Domingo y Cantuta, en la localidad de Chosica.

Fuente: Elaboración propia

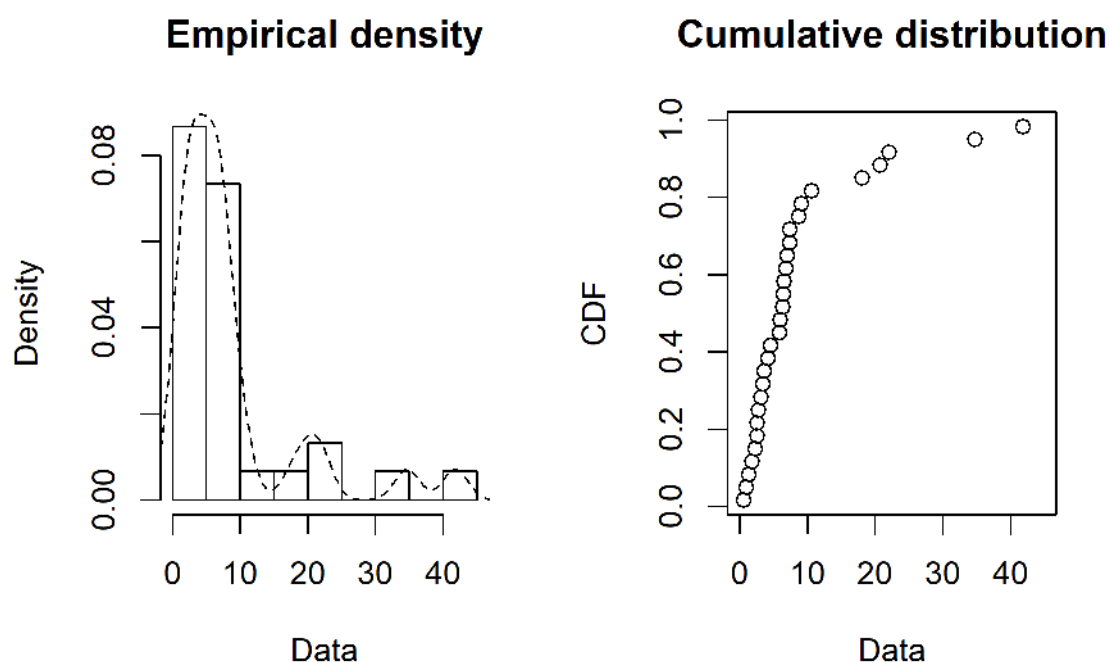


Figura 15. Frecuencia relativa y acumulada de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.
Fuente: Elaboración propia

Tal como se puede observar en la Figura 15, la serie de precipitación máxima en 24 horas presenta una distribución de probabilidad empírica asimétrica positiva. El rango de variabilidad está comprendido entre 10.0 y 40.0 mm. Los valores más frecuentes se encuentran en la clase 0,0-10,0 mm.

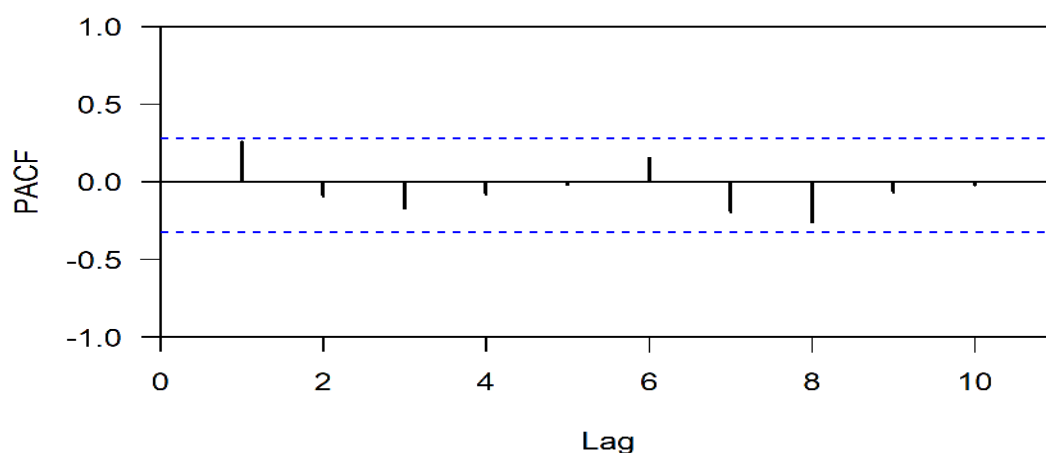


Figura 16. Autocorrelograma parcial de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.
Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se puede observar que la serie de tiempo analizada es independiente (Ver Figura 16). De forma similar, se ha estimado los p-valores de las pruebas de Mann-Kendall (1987) y Pettit (1979) con un nivel de significancia de 5%, y cuyas hipótesis nulas corresponden a que la serie de tiempo proviene de una muestra estacionaria y no presentan diferencias significativas en la media, respectivamente.

Los resultados se muestran en la Tabla 5 y sugieren que la serie de precipitación máxima en 24 horas es estacionaria.

Tabla 5. Índices estadísticos para establecer la estacionariedad de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.

Mann-Kendall p-value	Pettit p-value
0,20	0,72

4.2 Análisis de frecuencias

El objetivo en esta sección fue la de ajustar las distribuciones de probabilidad teóricas disponibles a los datos observados de precipitación máxima en 24 horas a fin de poder hacer extrapolaciones para diferentes periodos de retorno.

En este estudio se aplicó las pruebas de Kolmogorov-Smirnov, el Criterio de Información de Akaike (*AIC* por sus siglas en inglés) y el Criterio de Información Bayesiano (*BIC* por sus siglas en inglés) como índices de bondad de ajuste.

La prueba de Kolmogorov-Smirnov consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_0(X_m)$ y la estimada $F(X_m)$:

$$D = \max |F_0(X_m) - F(X_m)|$$

Con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado (95% de significancia). Si $D < d$, se acepta la hipótesis nula. La función de distribución de probabilidad observada se calcula como:

$$F_0(X_m) = 1 - \frac{m}{n + 1}$$

Donde:

M : número de orden de dato X_m en una lista de mayor a menor

n : número total de datos.

El criterio de información de Akaike mide la bondad de ajuste a partir de la máxima verosimilitud del modelo y la complejidad del modelo, teniendo en cuenta la cantidad de parámetros.

$$AIC = 2k - 2 \ln(L)$$

Donde:

K : Número de parámetros

L : Valor máximo en la función de verosimilitud

Por último, el Criterio de Información Bayesiano es muy parecido al criterio de Akaike, que incorpora en la medida de la complejidad al número de datos. El criterio viene dado por:

$$BIC = k \ln(n) - 2 \ln(L)$$

Donde:

K : Número de parámetros

L : Valor máximo en la función de verosimilitud

n : número total de datos.

De las estaciones pluviométricas con las que se cuenta con información de precipitación máxima en 24 horas, se estableció que la más representativa es la estación Chosica, por encontrarse en una zona adyacente a las quebradas Santo Domingo y Cantuta.

Además, esta estación cuenta con una serie de registros confiables a lo largo de un periodo de 30 años (1990 – 2019), y es operada por el SENAMHI.

En la Tabla 6 se muestran los valores de las pruebas de bondad de ajuste generados por las diferentes distribuciones, donde se puede observar que la distribución LogNormal presenta un mejor ajuste acorde con las ocurrencias meteorológicas registradas en la zona de estudio.

Tabla 6. Índices estadísticos de ajuste de las distribuciones teóricas de probabilidad.

Distribución	Kolmogorov	AIC	BIC
	Smirnov		
Weibull	0,17	193,23	196,03
Lognormal	0,11	188,96	191,76
Normal	0,29	224,44	227,25
Gamma	0,18	192,73	195,53
Gumbel	0,20	203,27	206,08
Exponential	0,16	191,34	192,74

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 17, se muestra las distribuciones de probabilidad que se evaluaron para la serie de precipitaciones máximas de la estación Chosica. Se observa gráficamente que la distribución LogNormal es la que presenta mejor ajuste.

Luego de realizar la prueba de bondad de ajuste y de verificar que la distribución que mejor se ajusta es la distribución LogNormal, se calculó la serie de precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno.

Cabe resaltar que se realizó un ajuste a las precipitaciones máximas por el factor 1.13, utilizado para corregir los sesgos de subestimación de mediciones tomadas en intervalos fijos cada 24 horas, de acuerdo a lo recomendado por la World Meteorological Organization (WMO,1994).

Las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retornos se presentan en la Tabla 7 y Figura 18. Se ha estimado la incertidumbre paramétrica de la distribución LogNormal a través de un método de remuestreo (Bootstrap simulation).

Tabla 7. Magnitud de la precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno.

	2	5	10	25	50	100	200	500
Mediana	5,40	12,29	18,91	29,92	40,25	52,55	67,08	90,17
2,50%	3,77	8,03	11,73	16,52	20,92	25,53	31,10	39,51
97,50%	7,70	18,19	29,55	52,07	73,34	100,97	137,56	197,62

Fuente: Elaboración propia

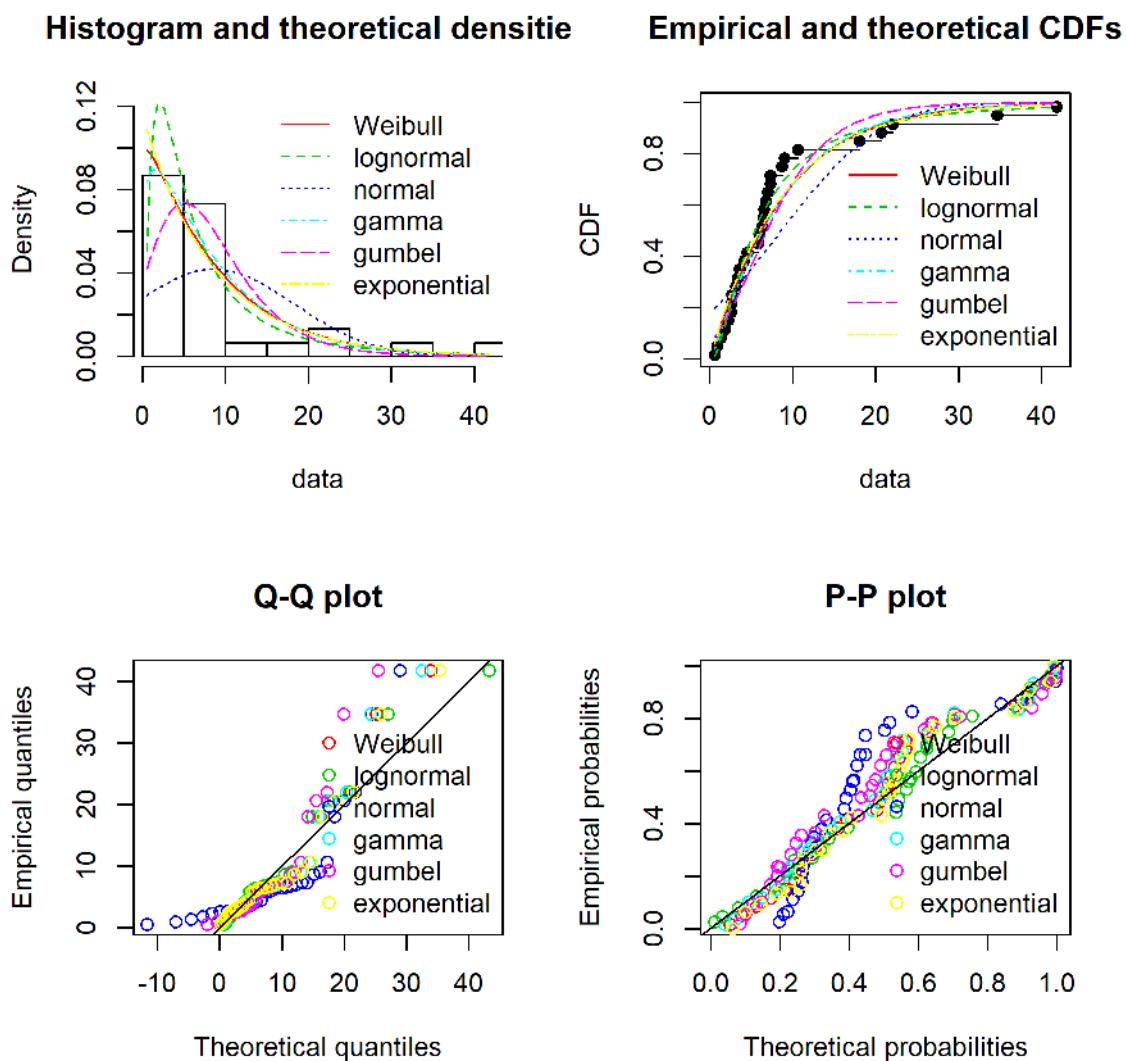


Figura 17. Distribuciones probabilísticas teóricas de ajuste de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.
Fuente: Elaboración propia

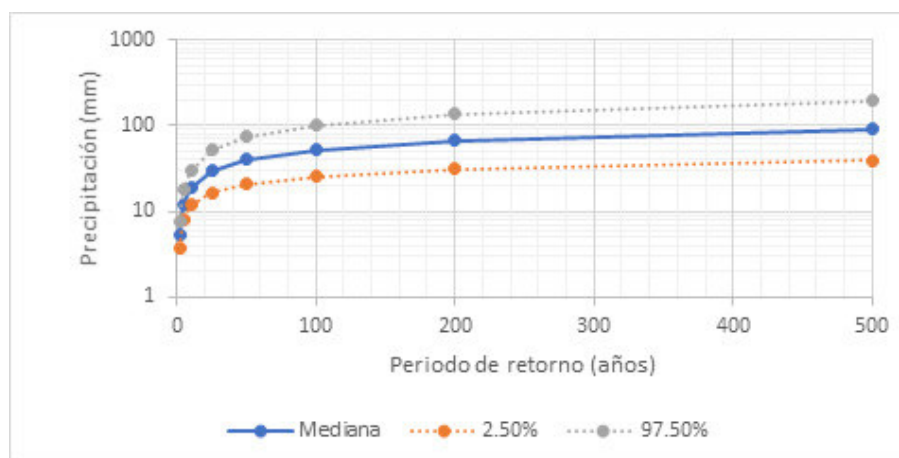


Figura 18. Relación periodo de retorno versus magnitud de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.
Fuente: Elaboración propia

4.3 Desarrollo de curvas IDF

La estación de lluvia ubicada en la zona del proyecto no cuenta con registros pluviográficos que permitan obtener registros de intensidades máximas o no han sido proporcionadas para el desarrollo de la presente consultoría.

Para superar este problema se recurrió al principio conceptual, referente a que los valores extremos de lluvias de alta intensidad y corta duración, en el mayor de los casos, marginalmente dependientes de la localización geográfica, tienen propiedades físicas similares en la mayor parte del mundo, con base en el hecho de que estos eventos de lluvia están asociados con celdas atmosféricas.

Existen varios modelos para estimar la intensidad a partir de la precipitación máxima en 24 horas. Uno de ellos es el modelo de Frederick Bell (1969) que permite calcular la lluvia máxima en función del período de retorno, la duración de la tormenta en minutos y la precipitación máxima de una hora de duración y periodo de retorno de 10 años. La expresión es la siguiente:

$$P_t^T = (0.21 \log_e T + 0.52)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_{60}^{10}$$

Donde:

t : Duración en minutos

T: Periodo de retorno en años

: Precipitación caída en t minutos con periodo de retorno de T años

: Precipitación caída en 60 minutos con periodo de retorno de 10 años

El valor de P_{60}^{10} puede ser calculado a partir del modelo de Yance Tueros, que estima la intensidad máxima horaria a partir de la precipitación máxima en 24 horas.

$$I = aP_{24}^b$$

I: intensidad máxima en mm/h

a, b: parámetros del modelo; 0.4602, 0.876, respectivamente

P24: precipitación máxima en 24 horas

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia, se han calculado indirectamente, mediante la siguiente relación:

$$I = \frac{KT^m}{t^n}$$

Donde:

I : Intensidad máxima (mm/min)

K, m, n: factores característicos de la zona de estudio

T: período de retorno en años

t: duración de la precipitación equivalente al tiempo de concentración (min)

Si se toman los logaritmos de la ecuación anterior se obtiene:

$$\text{Log}(I) = \text{Log}(KT^m) - n\text{Log}(t)$$

O bien

$$Y = a_0 + a_1 X_1$$

Los factores a_0 y a_1 , se obtienen a partir de las intensidades máximas calculadas anteriormente con el modelo de Frederick Bell, mediante una regresión lineal. En la Tabla 8, se muestra los coeficientes obtenidos de la regresión lineal para diferentes periodos de retorno:

Tabla 8. Valores de los parámetros de la relación IDF para la estación Chosica.

PR (años)	Log10(KTm)	n
2	1,784	-0,621
5	1,894	-0,621
10	1,962	-0,621
25	2,038	-0,621
50	2,088	-0,621
100	2,133	-0,621
200	2,173	-0,621
500	2,222	-0,621

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 19, se muestra las curvas de intensidad-duración-frecuencia para diferentes periodos de retorno y duración considerando los factores a_0 y a_1 mostrados previamente.

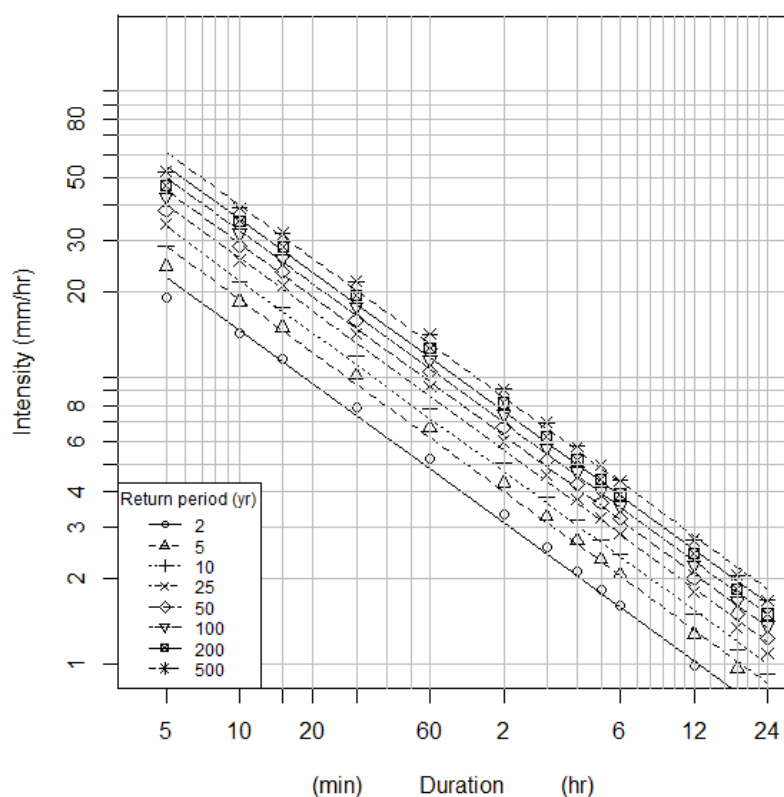


Figura 19. Curvas IDF de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.

Fuente: Elaboración propia

4.4 Tormenta de diseño

Para obtener los hietogramas de precipitación de diseño se utilizó la distribución de tormentas del Servicio de conservación de suelos (SCS/NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

El SCS/NRCS desarrolló hietogramas de diseño sintéticos para duraciones de tormenta de 6 y 24 horas. Estableció 4 tormentas de 24 horas de duración denominadas Tipo I, IA, II y III.

Para el presente estudio se utilizó la distribución de tormenta SCS-II que corresponde a lluvias orográficas de 6 horas de duración. Asimismo, se utilizó los perfiles de tormenta de las Curvas de Huff (segundo cuartil) que desarrolló el SENAMHI.

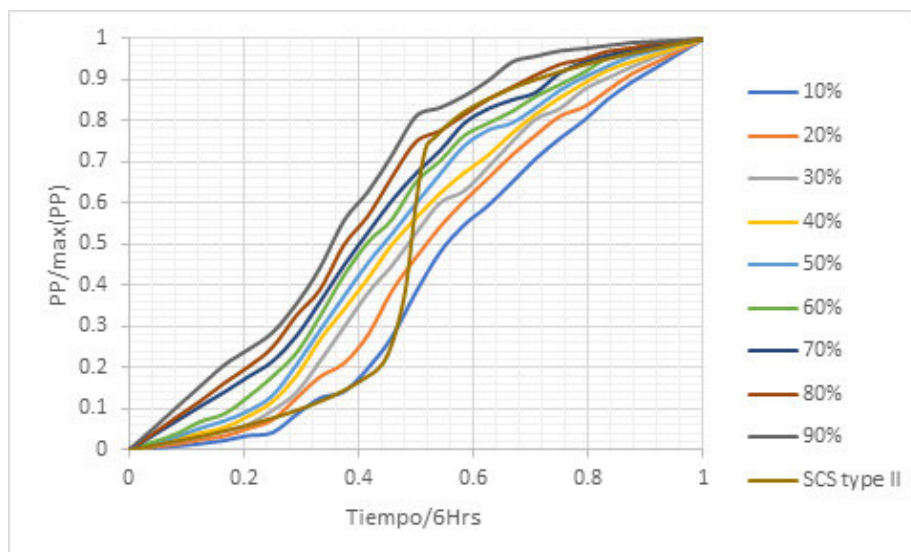


Figura 20. Perfiles de tormenta de 6 horas de duración tipo SCS-II y Curvas Huff (segundo curtil) usados en la simulación del proceso de precipitación-escorrentía.

Fuente: Elaboración propia

Para desarrollar las Curvas de Huff, el SENAMHI utilizó la serie de tiempo del producto de precipitación estimada por satélite PERSIANN-CCD.

Tal como se puede observar en la Figura 20, las Curvas de Huff (CH) representan la distribución temporal de la tormenta relacionada a diferentes percentiles. De lo anterior se podría sugerir que la respuesta fluvial de una tormenta con perfil CH-10% será más lenta que la CH-90%.

Cabe resaltar que el perfil SCS-II intercepta casi todos los perfiles CH. Lo que sugiere que esta curva podría corresponder a una condición media de la distribución temporal de la intensidad de lluvia durante toda la tormenta.

5 SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA

Para simular el proceso de precipitación-escorrentía y la producción de sedimentos, se ha utilizado el modelo TREX. Este modelo ha sido desarrollado en la Universidad de Colorado. La herramienta de código libre está disponible en el repositorio de la universidad en mención. (https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/TREX%20Web%20Pages/TREX-Home.html).

TREX es un modelo físicamente basado, Hortoniano, a escala de eventos hidrometeorológicos que simula diferentes procesos (ver Figura 21), tales como: almacenamiento superficial, interceptación, infiltración, transmisión, flujo superficial en terrazas en dos dimensiones (onda difusiva) y flujo en canales en una dimensión (onda cinemática).

Asimismo, simula la producción de sedimentos considerando los siguientes procesos físicos: erosión por salpicadura, laminar y en surcos, erosión fluvial (agradación-degradación de cauces), transporte total de sedimentos, deposición y el cambio morfológico de cuencas.

Sin embargo, tiene las siguientes limitantes: no considera la erosión en cárcavas, la iniciación de canales, la erosión en bancos, la formación de barras de sedimentos, la evolución de meandros.

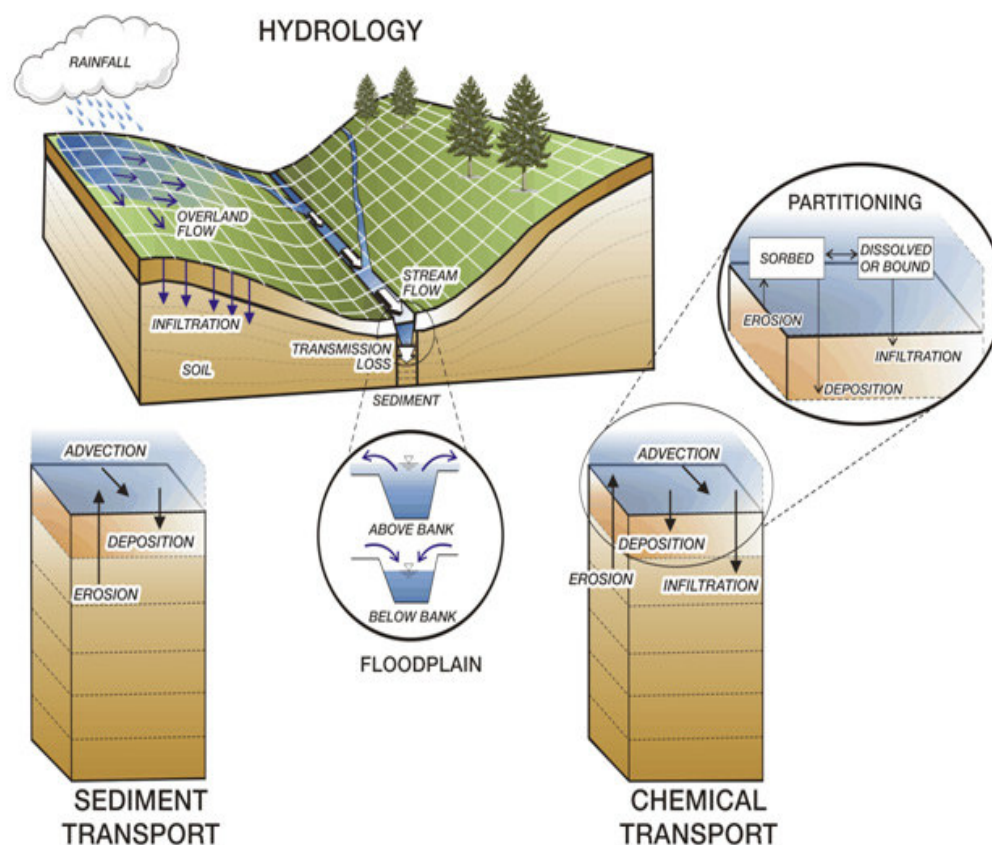


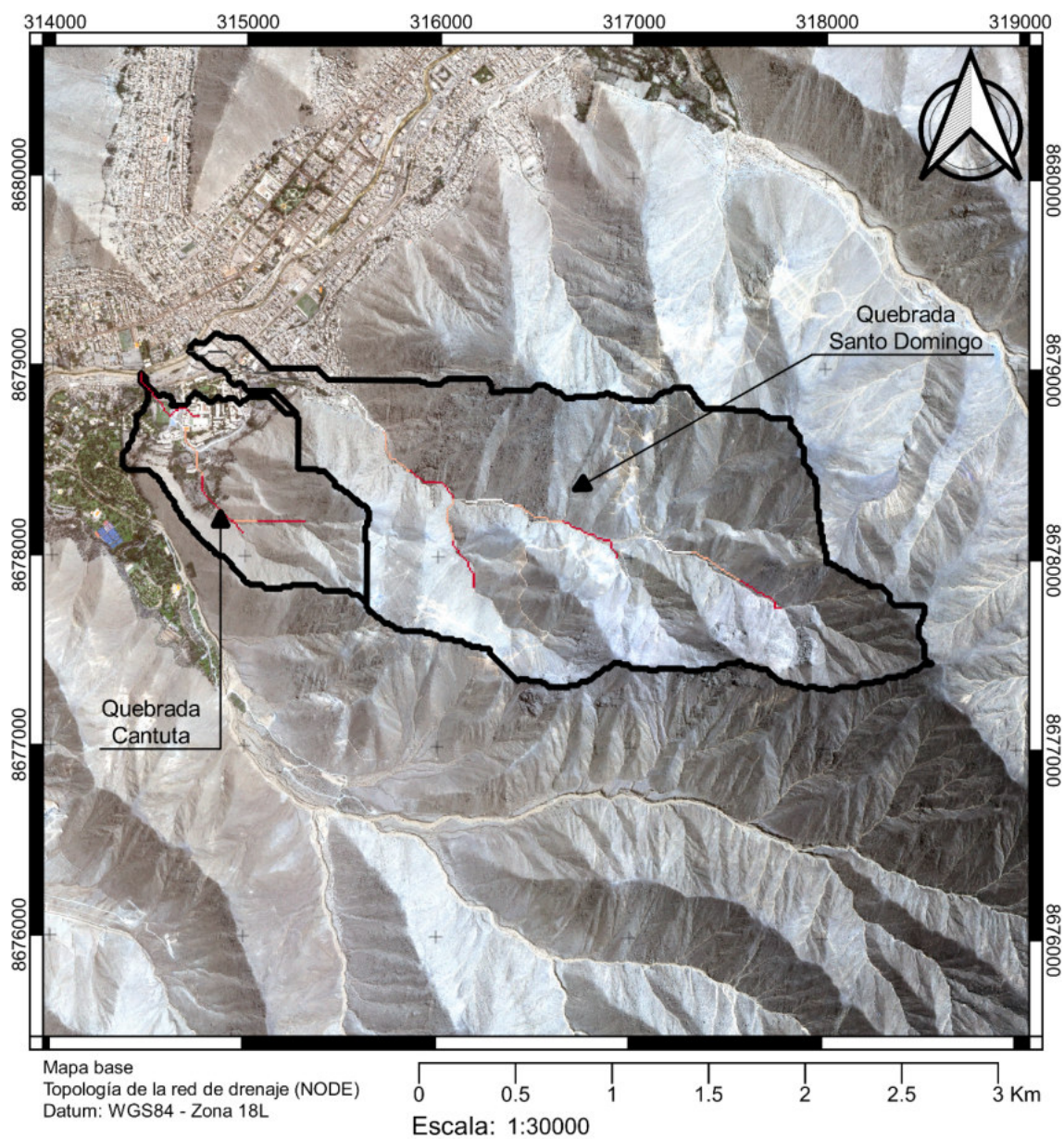
Figura 21. Esquema conceptual del modelo TRES.

Fuente: Elaboración propia

La representación espacial de la cuenca se realiza a través de la discretización topológica considerando especialmente la red de drenaje, tal como se muestra en la Figura 22 y 23. Se puede observar que se ha considerado un cauce principal con dos tributarios. Asimismo, se ha considerado una resolución espacial de 10 m para discretizar todas las propiedades físicas de las quebradas Santo Domingo y Cantuta.

Además de lo anterior, TRES necesita de información del uso y cobertura de suelos (Figura 14) para representar los parámetros de rugosidad superficial e interceptación. Asimismo, un mapa de regolita, tipo de suelo o geoformas (Figura 11) para representar la conductividad hidráulica saturada, presión de succión, etc.

Tal como se puede apreciar en la Tabla 9, se ha caracterizado los parámetros del modelo de infiltración de agua en el suelo de Green-Ampt. Se resalta que el parámetro más sensible corresponde a la conductividad hidráulica saturada. Los referidos valores han sido estimados en base a la experiencia del autor y no ha sido posible validarlos pues en las quebradas Santo Domingo y Cantuta no se mide la producción de agua y sedimentos cuando se activan.



Leyenda

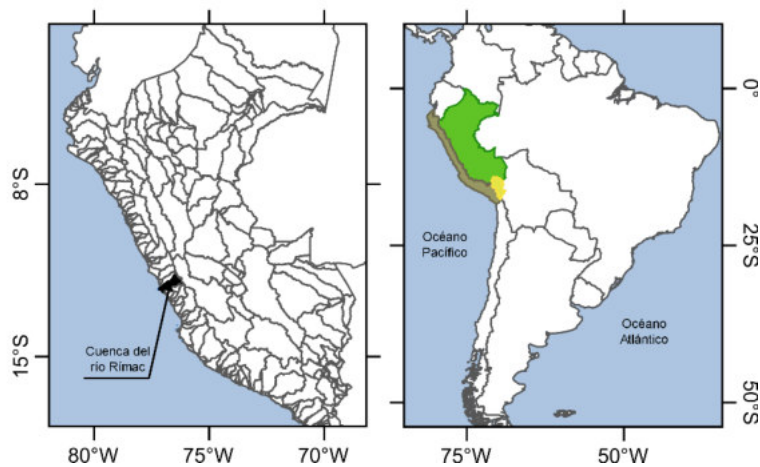
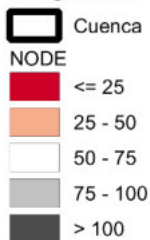
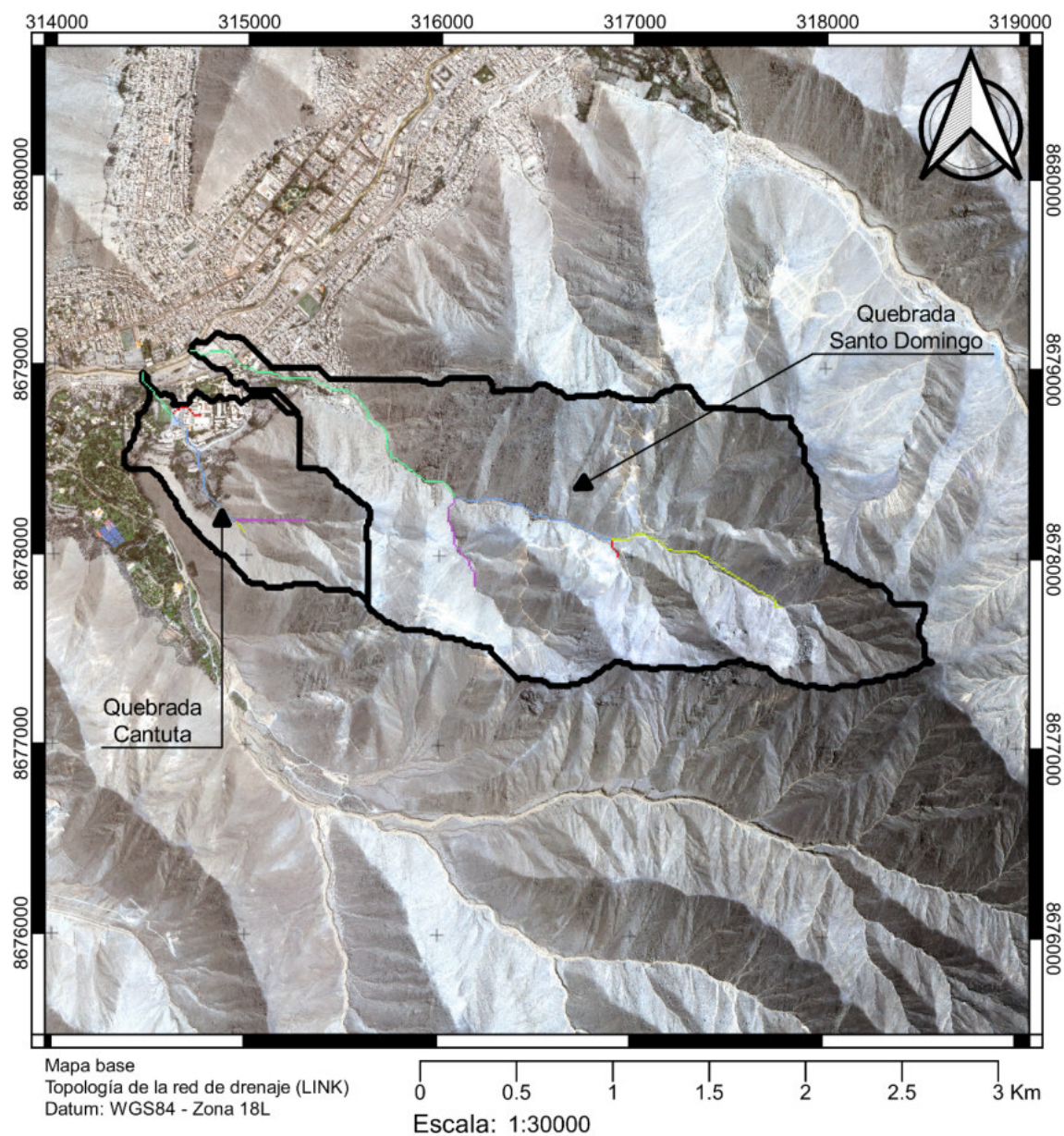


Figura 22. Representación topológica de las quebradas Santo Domingo y Cantuta (NODE).

Fuente: Elaboración propia



Leyenda

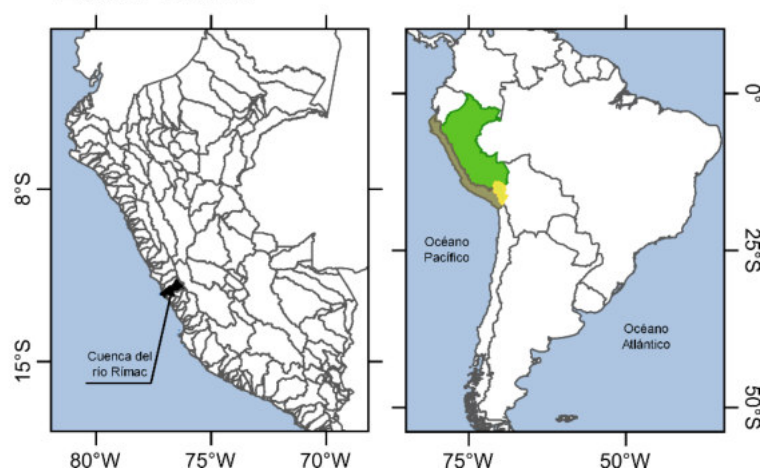


Figura 23. Representación topológica de las quebradas Santo Domingo y Cantuta (LINK).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Parámetros para caracterizar el proceso de infiltración del agua en el suelo.

Geoforma	Parámetros		
	kh (m^1s^{-1})	cpsh (m)	soilmd (-)
Valley	3,0E-09	0,01	0,29
Lower slope (warm)	5,5E-10	0,01	0,29
Upper slope (warm)	8,5E-10	0,01	0,29
Mountain/divide	9,5E-12	0,01	0,29
Upper slope	9,5E-12	0,01	0,29
Peak/ridge (warm)	5,5E-12	0,01	0,29

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, en base a los resultados encontrados y lo descrito líneas arriba (acápite 3.1.6 Mecánica de suelos) es recomendable simular el proceso de precipitación-escorrentía considerando impermeable la superficie de los depósitos sedimentarios.

Por otro lado, para caracterizar la intercepción de la lluvia y la rugosidad superficial (número de Manning), se ha usado los valores que se muestran en la Tabla 10. Cabe resaltar que la mayor parte de la cuenca está clasificada como suelo desnudo, en donde los depósitos aluviales, coluviales y la roca fragmentada está expuesta. Es por ello que se justifica la magnitud de los valores de rugosidad seleccionados.

Como se puede observar, se ha considerado una intercepción de lluvia nula debido a que la cobertura vegetal en toda la cuenca es escasa y las praderas no contienen un área foliar importante.

Tabla 10. Parámetros para caracterizar la rugosidad superficial e intercepción de la lluvia.

LULC	Parámetros	
	n (-)	intercp (mm)
Pradera	0,05	0
Zona Urbana	0,04	0
Suelo desnudo	0,07	0

Fuente: Elaboración propia

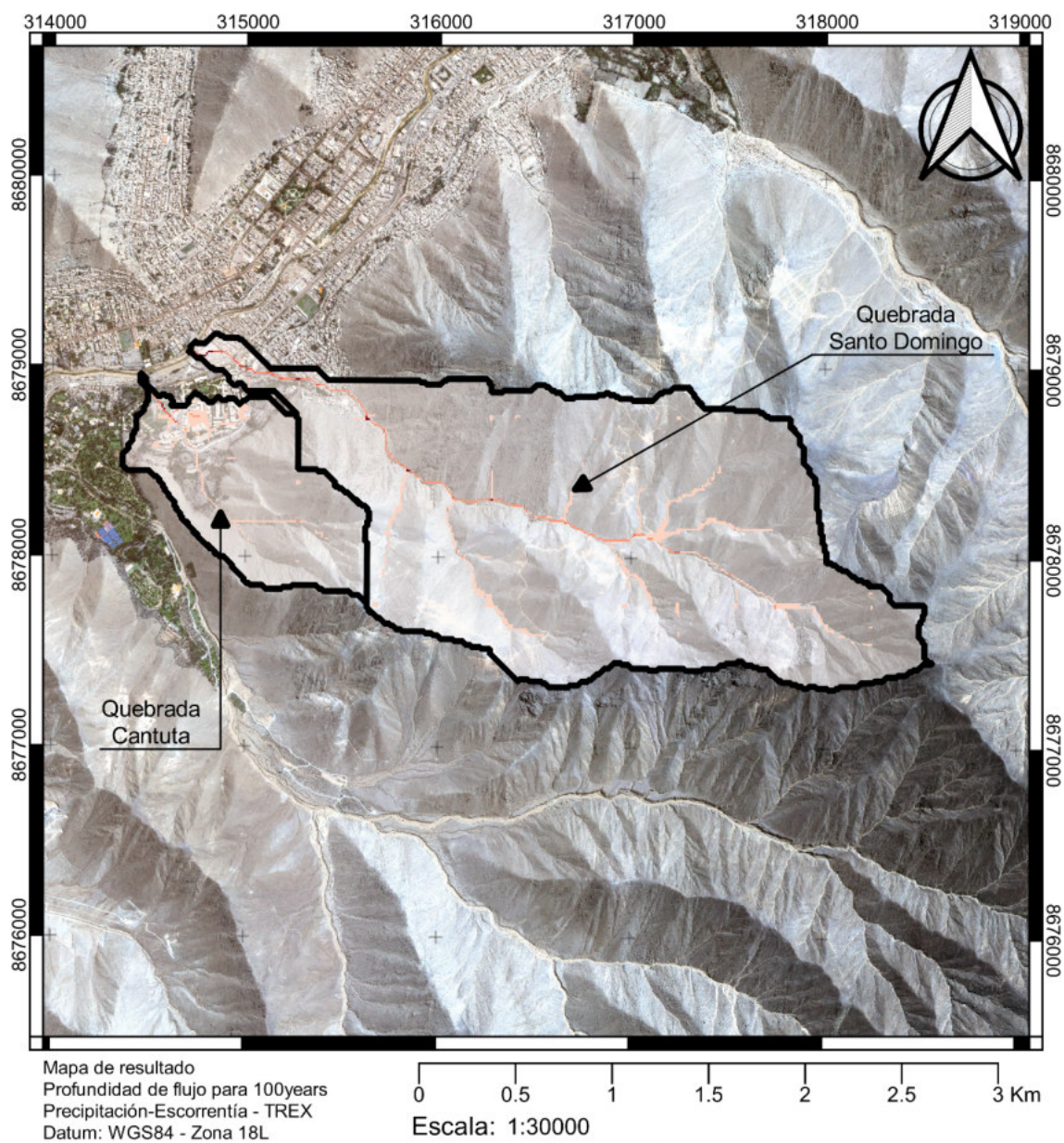
5.1 Resultados

Considerando que tenemos 10 perfiles de tormenta (CH10-90% y SCS-II) de 6 horas de duración, se ha simulado el proceso de precipitación-escorrentía para el periodo de retorno de 100 años.

Tal como se puede observar en la Figura 24, que corresponde al escenario de 100 años de periodo de retorno y el perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración, se resalta que el patrón espacial de la profundidad de flujo obedece al gradiente topográfico y está fuertemente influenciado por la red de drenaje. Se han obtenido profundidades de flujo de hasta 1 metro en el cauce principal de la quebrada Santo Domingo y Cantuta.

Las Figuras 25 y 26 muestran el hidrograma de avenida para el periodo de retorno de 100 años. Se resalta que el perfil de tormenta tiene una fuerte influencia sobre el tiempo al pico y centro de gravedad de los hidrogramas.

Es notable como el perfil de tormenta CH90% presenta una rápida respuesta de la escorrentía superficial. Asimismo, el hidrograma de CH10% recién comienza a ascender aproximadamente 2 horas después de CH90%. Todos los demás perfiles CH20-80% están entre los antes mencionados.



Leyenda

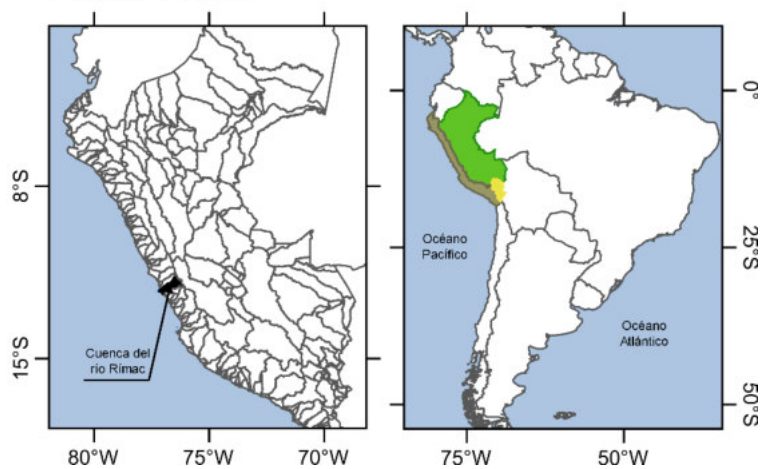
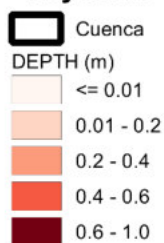


Figura 24. Resultados de la simulación del proceso de precipitación escorrentía usando el modelo TREX para las quebradas Santo Domingo y Cantuta.

Fuente: Elaboración propia

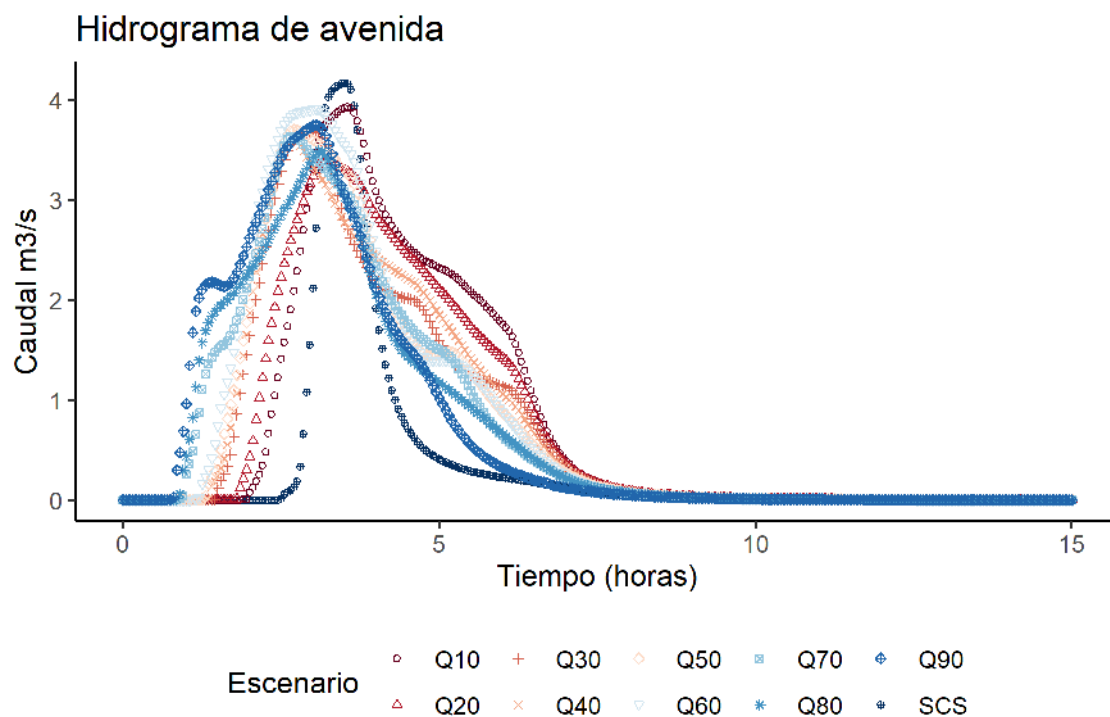


Figura 25. Hidrograma de avenida para un periodo de retorno de 100 años y distintos perfiles de tormenta de la quebrada Santo Domingo usando el modelo TREX.

Fuente: Elaboración propia

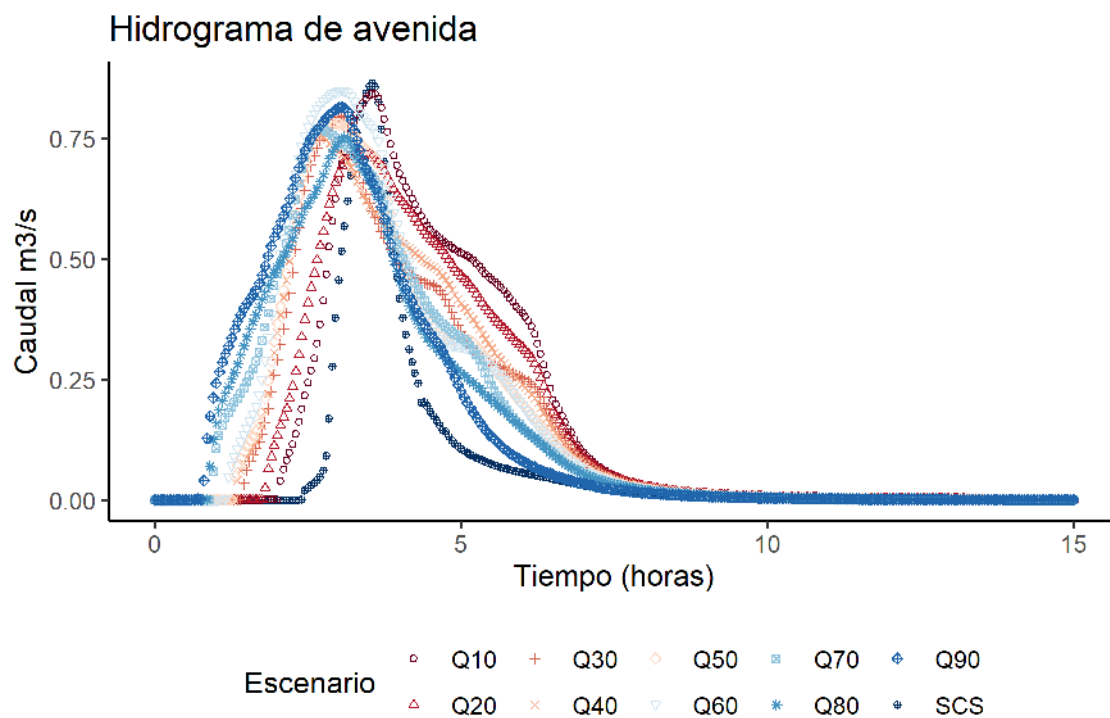


Figura 26. Hidrograma de avenida para un periodo de retorno de 100 años y distintos perfiles de tormenta de la quebrada Cantuta usando el modelo TREX.

Fuente: Elaboración propia

Además, los resultados del perfil de tormenta SCS-II sugieren que la respuesta hidrológica es más violenta, debido a que la pendiente de ascenso y descenso del hidrograma es mayor a todos los casos evaluados entre CH10-90%.

6 SIMULACIÓN DEL TRÁNSITO DE FLUJOS DE ESCOMBROS

Para la simulación del tránsito de flujos hiperconcentrados se ha utilizado el modelo Flo2D (FLO-2D Software, Inc., 2018). Esta herramienta simula el flujo de escombros en dos dimensiones considerando las ecuaciones del flujo en superficie libre promediadas en la profundidad. La ecuación de continuidad está dada como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = i$$

Donde h es la profundidad del flujo de escombros (m), u es la profundidad media del flujo en el eje x (m^1s^{-1}), v es la profundidad media del flujo en el eje y (m^1s^{-1}) e i es la intensidad de la lluvia (mm^1hr^{-1}).

Asimismo, las ecuaciones de momentum se describe de la siguiente manera:

$$S_{fx} = S_{bx} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g \partial t} - u \frac{\partial u}{g \partial x} - v \frac{\partial u}{g \partial y}$$

$$S_{fy} = S_{by} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g \partial t} - u \frac{\partial v}{g \partial x} - v \frac{\partial v}{g \partial y}$$

Donde S_{fx} , S_{fy} corresponden a la pendiente de fricción en los ejes x - y , respectivamente. S_{bx} , S_{by} son la pendiente de fondo en los ejes x - y , respectivamente. g es la aceleración de la gravedad (m^1s^{-2}). Las ecuaciones de momentum representan el balance de las fuerzas representativas en las dos dimensiones consideradas (x - y). Incluyen, de izquierda a derecha, pendiente de fricción afectada por la potencia de los sedimentos en contacto (modelo reológico), pendiente de fondo debido a la gravedad, el gradiente de presión, el término de aceleración local de las fuerzas de inercia, y la aceleración convectiva.








Flo2D usa un modelo reológico cuadrático presentado por O'Brien y Julien (1998), que incluye esfuerzos de cedencia, esfuerzos viscosos, esfuerzos cohesivos y esfuerzos turbulentos. Los parámetros para caracterizar el modelo reológico son: la rugosidad superficial, la concentración en volumen (CV), el esfuerzo de cedencia, la viscosidad, y la densidad de los sedimentos. La experiencia indica que los parámetros más importantes son la rugosidad superficial y la concentración en volumen de la mezcla agua-sedimentos. El modelo reológico cuadrático de Flo2D está representado por la siguiente ecuación:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta u}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}}$$

Donde S_y es la pendiente de cedencia, S_v es la pendiente viscosa, y S_{td} es la pendiente turbulenta-dispersiva, es el esfuerzo de cedencia de Bingham, η es la viscosidad dinámica de Bingham, γ_m peso unitario del flujo de escombros, K resistencia del flujo laminar, n coeficiente de rugosidad de Manning, h profundidad del flujo de escombros, u velocidad del flujo de escombros.



Leyenda

	Cuenca
	Flow Depth (m)
	0 - 0.21
	0.21 - 0.31
	0.31 - 0.46
	0.46 - 0.65
	0.65 - 4.2

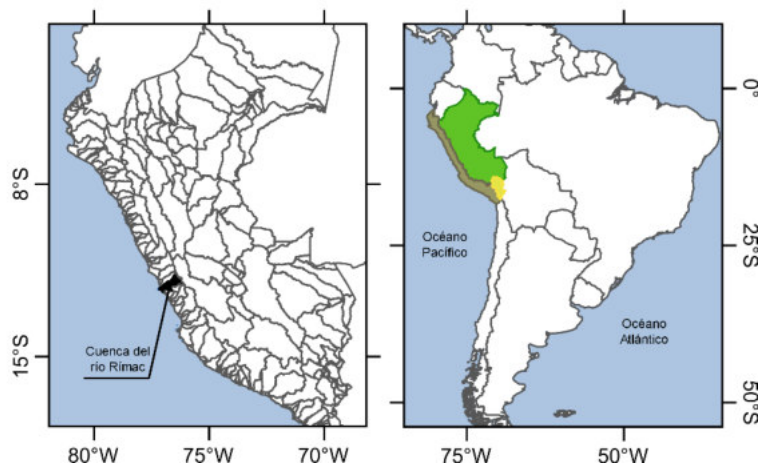


Figura 27. Profundidad máxima de flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración.

Fuente: Elaboración propia

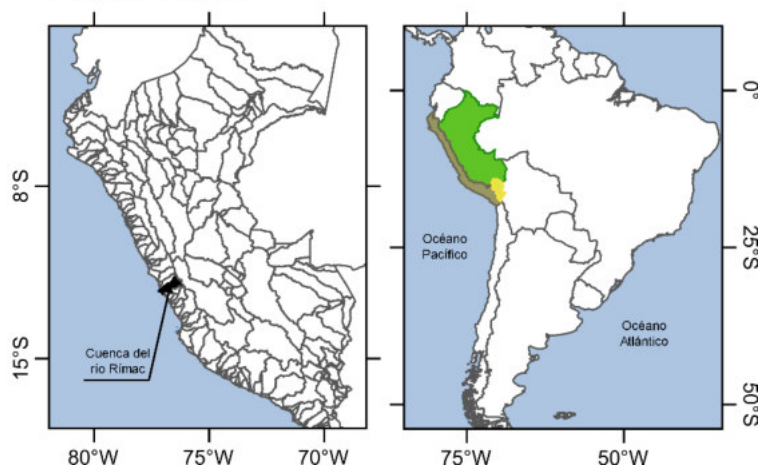
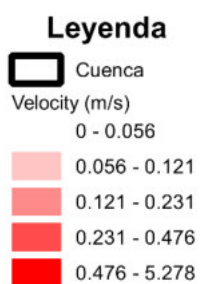
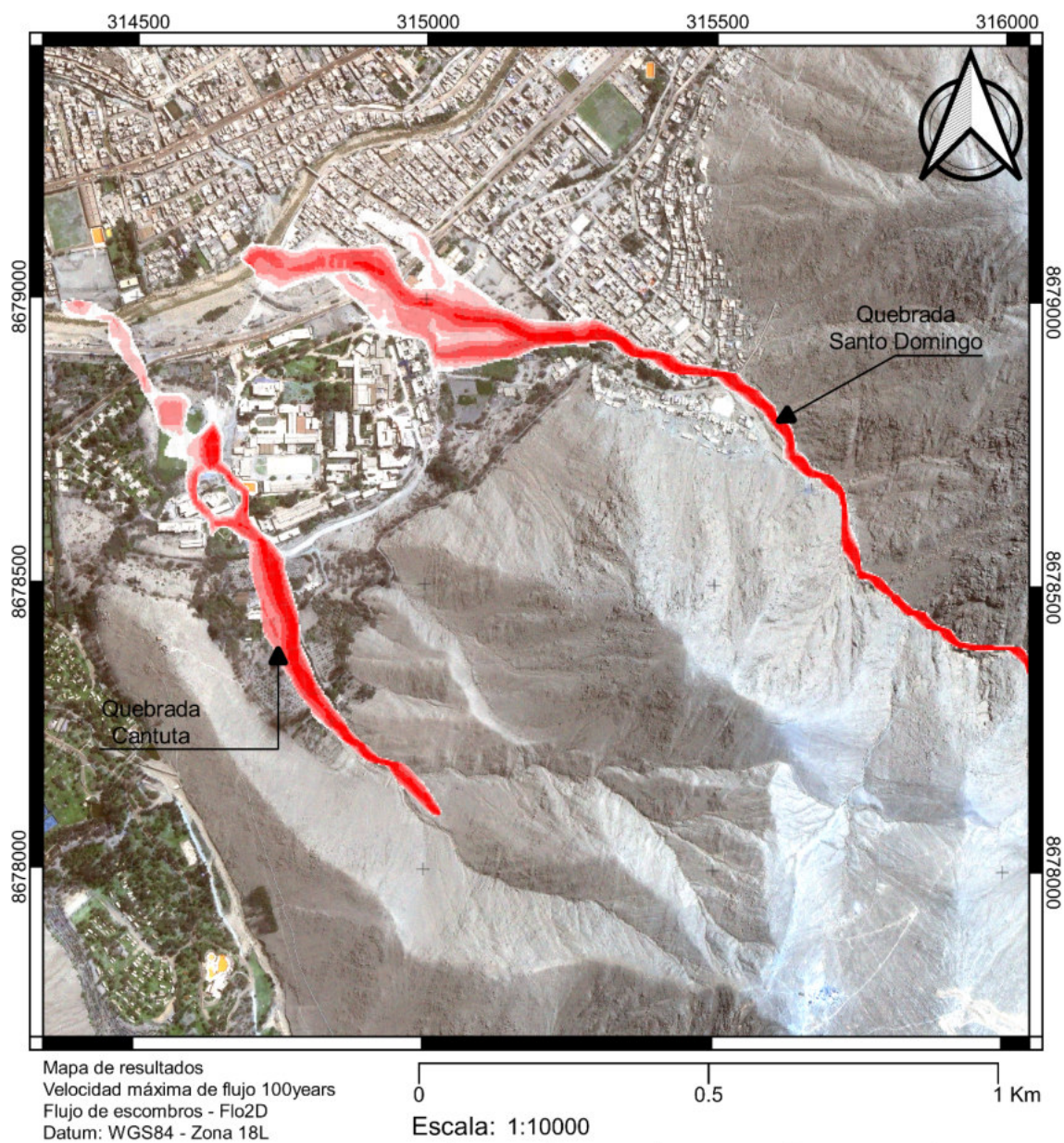


Figura 28. Velocidad máxima de flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración.

Fuente: Elaboración propia

En nuestro caso, se ha utilizado el mismo DSM documentado en líneas arriba. Como se requiere mayor detalle en la simulación del flujo de escombros, se ha remuestreado el DSM y se ha desarrollado una malla computacional de 3 m de resolución espacial.

Como condiciones de borde de aguas arriba se ha utilizado los hidrogramas generados en la simulación del proceso de precipitación-escorrentía con TREX. Para la de aguas abajo, se ha utilizado una condición de borde libre.

6.1 Modelo reológico

Para seleccionar los parámetros del modelo reológico usado para simular el tránsito de los flujos de escombros que produce las quebradas Santo Domingo y Cantuta, hemos considerado los siguientes criterios:

1. El valor seleccionado para la concentración en volumen de los sedimentos fue de 45%, teniendo en cuenta los resultados de los ensayos de mecánica de suelos realizados en las quebradas en estudio. Este valor está estrechamente relacionado con la producción de sedimentos de las quebradas asociado eventos extremos.
2. La relación entre el esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica, τ_y y η y la concentración en volumen, C_v , se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$$

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$$

Cabe resaltar que valores referenciales se pueden encontrar en el manual de usuario de Flo2D en función de ensayos estándar de mecánica de suelos.

3. El valor de Manning seleccionado tiene en cuenta la rugosidad superficial de los granos de sedimentos, a través de la granulometría, así como la generada por los elementos macrorugosos que se han podido observar en el trabajo de campo. Es por ello que se ha seleccionado el valor de 0,05 para representar la rugosidad total en el tramo de simulación.
4. La gravedad específica utilizada corresponde a los resultados de laboratorio de la matriz de sedimentos.

En la Tabla 11 se puede observar los parámetros del modelo reológico cuadrático utilizado para simular el tránsito de flujos de escombros en las quebradas Santo Domingo y Cantuta.

Tabla 11. Parámetros usados en el modelo reológico para la simulación con Flo2D.

Input value		Initial value	
Bingham yield stress	α_1	0,07	0,000462
	β_1		11,24
Bingham dynamic viscosity η	α_2	38,94	0,0811
	β_2		13,72
Manning's roughness coefficient n		0,05	
Specific gravity of debris flow Gs		2,671	
Resistance parameter for Laminar flow K		2285	
Volumetric concentratios of sediment C_v		0,45	

Fuente: Elaboración propia

6.2 Resultados

En las Figuras 27 y 28 se puede observar los resultados del tránsito del flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración.

Los resultados sugieren que, de ocurrir una tormenta con PR de 100 años, se afectaría una buena parte de la población asentada. Asimismo, se observa que la magnitud de la profundidad del flujo de agua-sedimentos podría llegar a los 4 m, así como la velocidad a los $5\text{m}^1\text{s}^{-1}$.

Además, considerando que la Cv representa la producción de sedimentos en cada quebrada, se ha evaluado los efectos de su variabilidad sobre la simulación del flujo de escombros, tal como se puede observar en la Tabla 12 y Figuras 29 y 30.

Los resultados sugieren que cuando la Cv es menor que 50%, la velocidad máxima del flujo de escombros se incrementa. Esto es debido a que las fuerzas relacionadas a la resistencia son menores a las fuerzas inerciales del flujo de escombros.

Asimismo, cuando la Cv es mayor que 50%, la profundidad máxima del flujo de escombros se incrementa, pero la velocidad decrece drásticamente.

Tabla 12. Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros.

Cv	Quebrada Santo Domingo		Quebrada Cantuta	
	h (m)	v (m^1s^{-1})	h (m)	v (m^1s^{-1})
20%	3,05	6,19	1,58	2,39
30%	3,47	5,31	1,74	2,10
40%	3,89	5,69	1,94	2,12
45%	4,20	5,28	2,22	2,13
50%	4,68	4,41	2,49	1,84
60%	5,89	2,96	2,53	1,08
70%	8,30	1,14	4,27	0,14
80%	9,54	0,41	5,20	0,16

Fuente: Elaboración propia

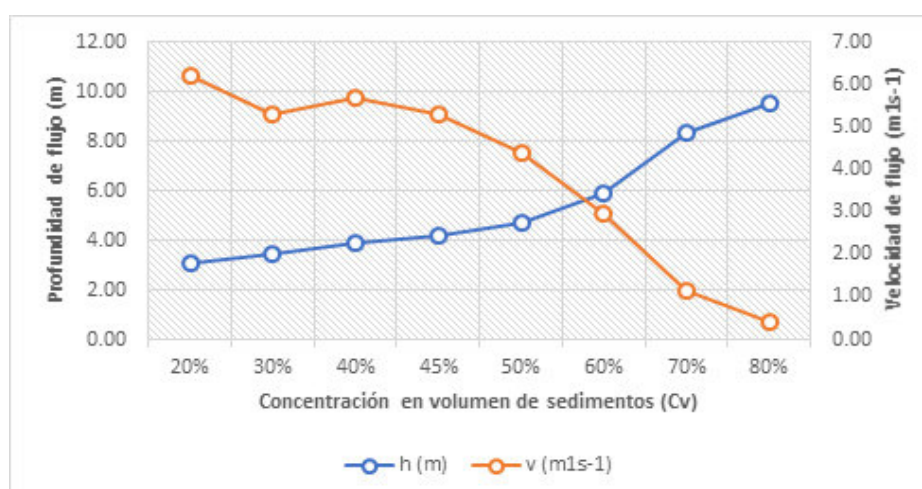


Figura 29. Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros para la quebrada Santo Domingo.

Fuente: Elaboración propia

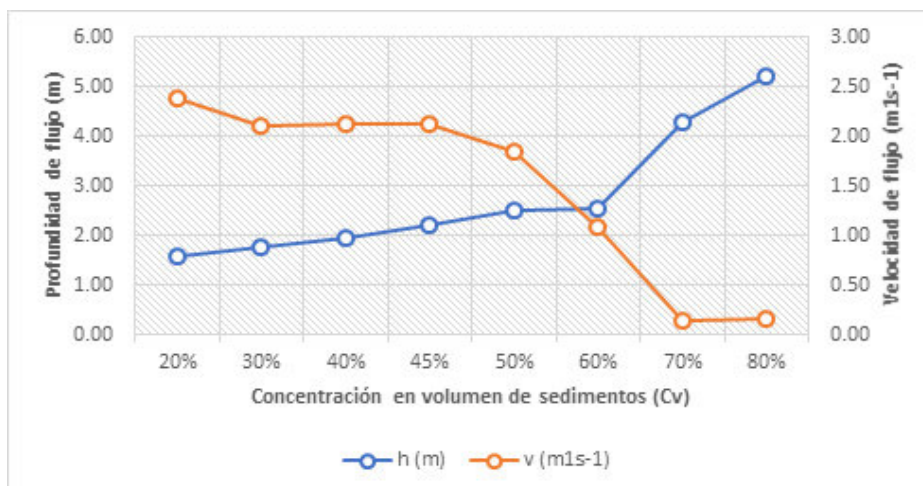


Figura 30. Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros para la quebrada Cantuta.

Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que la Cv tiene influencia en otros parámetros como el esfuerzo de cedencia y la viscosidad dinámica, tal como quedo evidenciado anteriormente.

Por tanto, los resultados sugieren que es sumamente importante estimar la producción de sedimentos de las quebradas cuando ocurren tormentas extremas, debido a que está estrechamente relacionado con la concentración en volumen de sedimentos. En otras palabras, que la relación entre la lluvia, la escorrentía y producción de sedimentos es un fenómeno altamente no lineal que debe de ser analizado en conjunto.

La Tabla 13 presenta los resultados de la sensibilidad del número de Manning (n) sobre la simulación del flujo de escombros en las quebradas Santo Domingo y Cantuta. Como es lógico, cuando la rugosidad superficial aumenta, aumenta la profundidad del flujo y disminuye la velocidad máxima. Asimismo, aumenta el volumen de agua-escombros depositados en el dominio computacional (cono aluvial donde está asentada la población) y el área total inundada.

Tabla 13. Relación entre el número de Manning (n) y la simulación del flujo de escombros.

n Manning	Quebrada Santo Domingo				Quebrada Cantuta			
	h (m)	v (m ¹ s ⁻¹)	Sed+H ₂ O (m ³)	A (m ²)	h (m)	v (m ¹ s ⁻¹)	Sed+H ₂ O (m ³)	A (m ²)
0,025	4,18	5,88	10742,32	85734,00	2,09	2,18	12412,65	48735,00
0,050	4,20	5,28	10778,25	86085,00	2,22	2,13	12412,78	49140,00
0,100	4,37	4,15	10886,03	87372,00	2,52	2,17	12416,52	49230,00
0,200	5,27	3,46	11201,04	90360,00	2,12	2,12	12007,92	49347,00

Fuente: Elaboración propia

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha realizado la simulación en cascada del fenómeno de iniciación y propagación de flujos de escombros de las quebradas Santo Domingo y Cantuta utilizando los modelos numéricos TREX y Flo2D.

Se ha realizado el análisis de frecuencias de la precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica y se han estimado las magnitudes para distintos periodos de retorno y se ha considerado lluvia uniforme sobre las quebradas Santo Domingo y Cantuta. Se han usado 10 perfiles de tormenta de 6 horas de duración. Sin embargo, se recomienda estudiar la variabilidad espacial de las tormentas y la aumentar la densidad de estaciones de registro de lluvia en tiempo real.

Se ha encontrado que la principal fuente de sedimentos corresponde a depósitos sedimentarios aluviales recientes y antiguos localizados en las márgenes de la red de drenaje. Asimismo, la superficie de estos depósitos se encuentra cementada; es decir, a efectos del proceso de precipitación-escorrentía, presenta una muy baja capacidad de infiltración del agua en el suelo. Se recomienda realizar ensayos de mineralogía de rocas para comprobar esta afirmación. Además, para efectos prácticos, se recomienda utilizar valores de conductividad hidráulica saturada en el orden de 10^{-12} o menores.

Se ha encontrado que los depósitos sedimentarios aluviales contienen clastos semi-redondeados embutidos en una matriz de arenas con escasa presencia de limos (<2%). Esto tiene incidencia directa sobre las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla de agua y sedimentos. De hecho, el fenómeno de movimientos en masa que da lugar es el de flujo de escombros activado por lluvias extremas.

Los resultados sugieren que los principales modos de erosión corresponden a la del tipo laminar, surcos, cárcavas y fluvial (cauce y bancos). Asimismo, debido a que el abanico aluvial está habitado por la población, no se evidencia zonas naturales de deposición de sedimentos.

Se ha simulado el proceso de precipitación-escorrentía con el modelo TREX. Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad de la topología de la red de drenaje y la rugosidad superficial sobre la simulación. Asimismo, simular la producción de sedimentos asociada a diferentes periodos de retorno para que la concentración en volumen ingrese como input al modelo Flo2D.

Se ha simulado el tránsito del flujo de escombros utilizando el modelo Flo2D y se ha realizado un análisis de sensibilidad de la concentración en volumen y coeficiente de rugosidad.

Se ha encontrado que el coeficiente de Manning tiene un impacto muy alto sobre el proceso de flujo de escombros y la morfología final del tramo de simulación. Asimismo, la concentración en volumen tiene efectos sobre los parámetros reológicos (esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica) y podría amplificar los efectos del flujo de escombros.

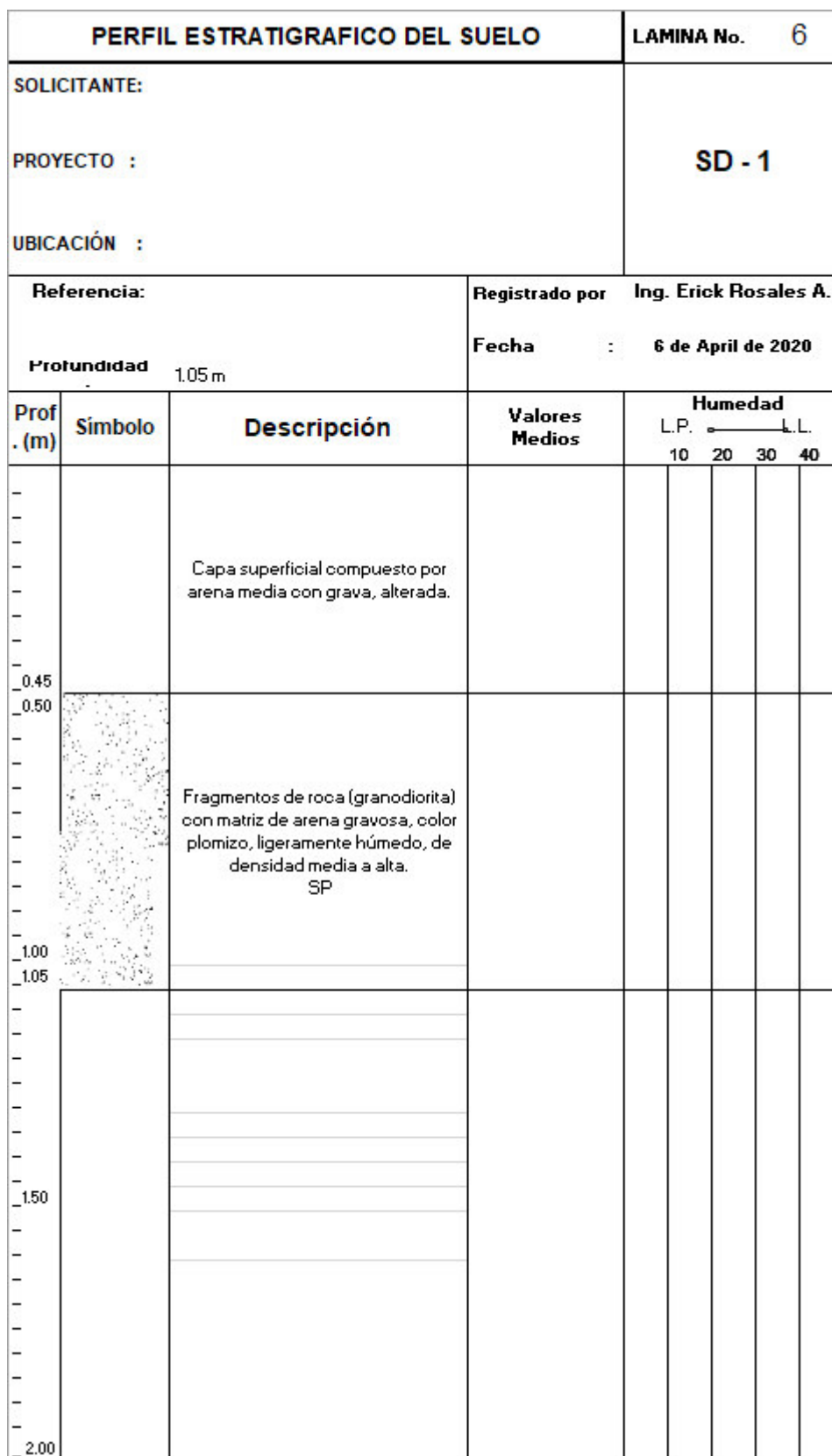
No se ha podido validar las simulaciones debido a que en las quebradas Santo Domingo y Cantuta no se cuenta con mediciones de las variables de flujo de agua ni sedimentos. Sin embargo, en base a la experiencia, los resultados son muy razonables. Se recomienda instalar cámaras LSPIV o de seguridad para registrar el paso del flujo de agua y sedimentos cuando se activen por lluvias intensas. Asimismo, para poder calibrar los procesos físicos, se recomienda utilizar el método geomorfológico, que implica realizar vuelos con Dron y obtener DSM antes y después de un evento de flujo de escombros importante y estimar las zonas de erosión y deposición de sedimentos en toda la quebrada y compararla con la simulación en cascada.

Para definir los umbrales de inundación de un sistema de alerta temprana, se recomienda considerar dos variables: la intensidad media de la precipitación y la duración total de la tormenta. Para efectos prácticos se recomienda simular los modelos configurados considerando diferentes escenarios en base a la variabilidad de estos dos factores.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chen, H.X., Zhang, L.M. (2015). EDDA 1.0: integrated simulation of debris flow erosion, deposition and property changes. *Geoscientific Model Development* 8(3), 829-844.
- [2] Iverson, R.M., Ouyang, C.J. (2015). Entrainment of bed material by earth-surface mass flow: Review and reformulation of depth-integrated theory. *Reviews of Geophysics* 53, 27-58.
- [3] Lee, B.Y., Mok, H.Y., Lee, T.C. (2010). The latest climate change in Hong Kong and its implications for the engineering sector, in: DHKO in the HKIE Conf. on climate change-Hong Kong Engineers' Perspective, Hong Kong Observatory, Government of Hong Kong SAR, Hong Kong.
- [4] O'Brien, J.S., Julien, P.Y. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows, in: Conference, Delineation of Landslide, Flash Flood, and Debris Flow Hazard. Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Utah, pp, 260-280.
- [5] O'Brien, J.S., Julien, P.Y. (1998). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering* 114(8), 877-887.
- [6] FLO-2D Software, Inc. (2018). Flo-2D Reference Manual. 153p
- [7] O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 119(2), 244-261.
- [8] Takahashi, T. (1981). Debris flow. *Annual Review of Fluid Mechanics* 13, 57-77.
- [9] Takahashi, T. (2014). Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. CRC press, London.
- [10] Quan Luna, B., Blahut, J., van Asch, T., van Westen, C., Kappes, M. (2016). ASCHFLOW – A dynamic landslide run-out model for medium scale hazard analysis. *Geoenvironmental Disasters* 3(1), 29.
- [11] Zhang, S., Zhang, L.M., (2017). Impact of the 2008 Wenchuan earthquake in China on subsequent long-term debris flow activities in the epicentral area. *Geomorphology* 276, 86-103.

9.1 Perfil estratigráfico de las calicatas



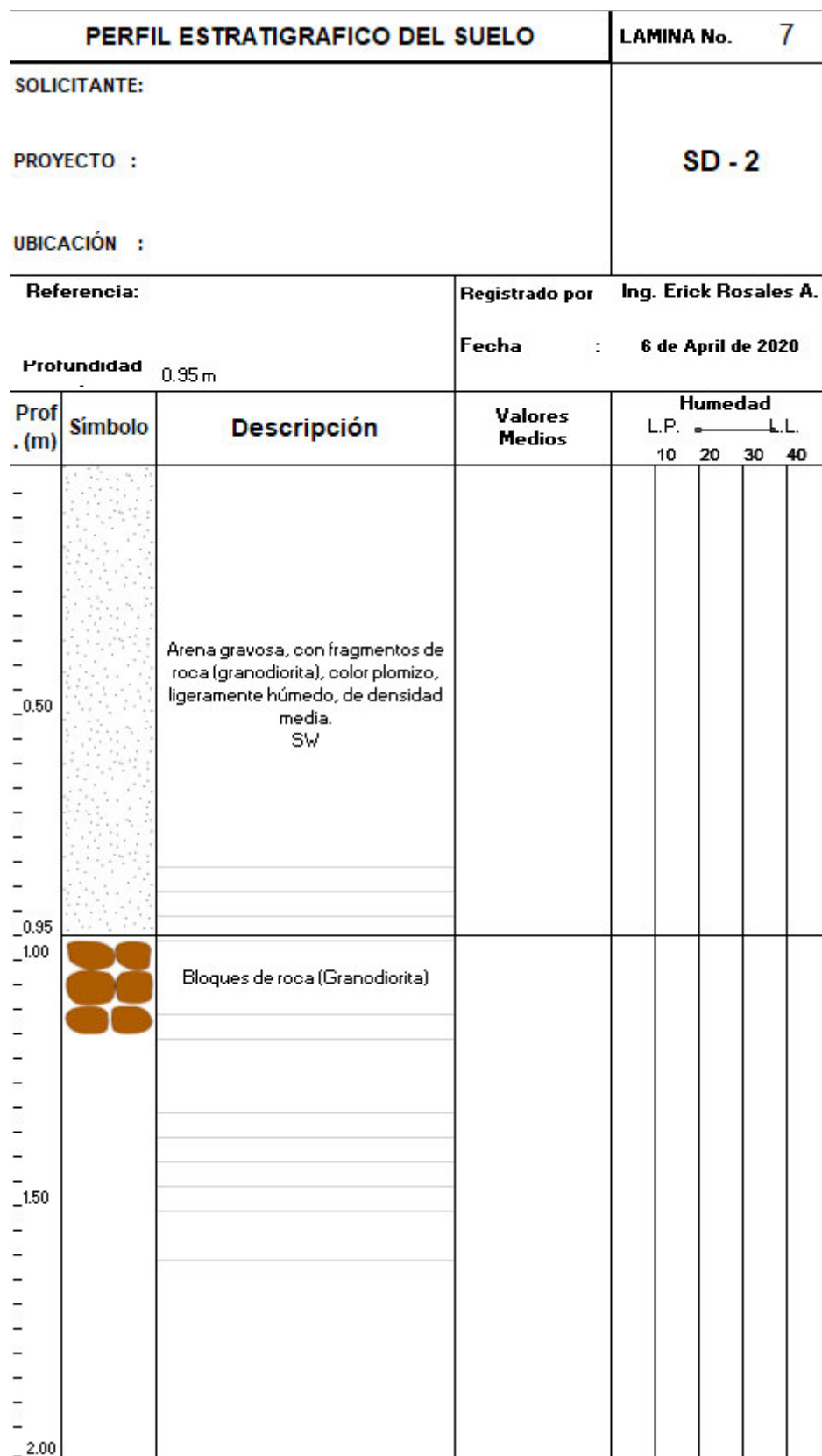


Figura 32. Perfil estratigráfico de la calicata #2 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Santo Domingo.

PERFIL ESTRATIGRAFICO DEL SUELO					LAMINA No.		8		
SOLICITANTE:					CA - 1				
PROYECTO :									
UBICACIÓN :									
Referencia:			Registrado por		Ing. Erick Rosales A.				
Profundidad 1.20 m			Fecha		: 6 de April de 2020				
Prof . (m)	Símbolo	Descripción	Valores Medios		Humedad				
					L.P.		L.L.		
					10	20	30	40	
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									
-									

Figura 33. Perfil estratigráfico de la calicata #1 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Cantuta.

Figura 34. Perfil estratigráfico de la calicata #1 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Cantuta.

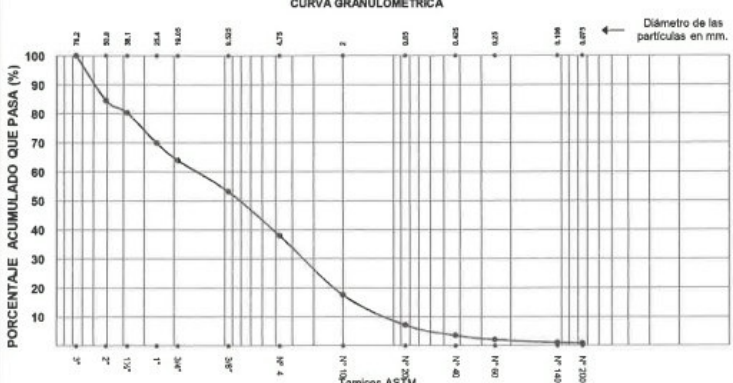
9.2 Resultados de laboratorio



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 249/2019

SOLICITANTE : HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME		
PROYECTO : ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		
UBICACIÓN : QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		Profundidad : 1.20 m.
CALICATA : CA-1		Muestra : MAB
FECHA : La Molina, 30 de diciembre de 2019		Téc. Resp. : M.M.R.
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422		LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318
MALLA	ABERTURA mm.	PORCENTAJE QUE PASA (%)
3"	76.20	100
2"	50.80	85
1 1/2"	38.10	80
1"	25.40	70
3/4"	19.05	64
3/8"	9.525	53
Nº 4	4.750	38
Nº 10	2.000	18
Nº 20	0.850	7
Nº 40	0.425	4
Nº 60	0.250	2
Nº 140	0.106	1
Nº 200	0.075	1
		Límite líquido (%)
		Límite plástico (%)
		Índice plástico (%)
		Límite de contracción (%)
Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282		
Coefficiente de:		
-Uniformidad		6.37
-Curvatura		0.50
Material:		
-Grava		62
-Arena		37
-Finos		1
Clasificación:		
-AASHTO		GP con arena
-SUCS		
Nombre de grupo:		
CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216		
Humedad natural (%)		-

CURVA GRANULOMÉTRICA	
	<p>Diámetro de las partículas en mm.</p> <p>Tamices ASTM</p>
Gruesa	Fina
Grava	
Gruesa	Media
Arena	
Fina	
Limos y Arcillas	
Finos	

OBSERVACIÓN :
NOTA : La Muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante.

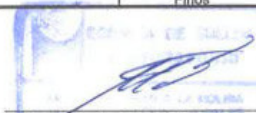

Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

Figura 35. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 1 (CA-1) de la quebrada Cantuta.

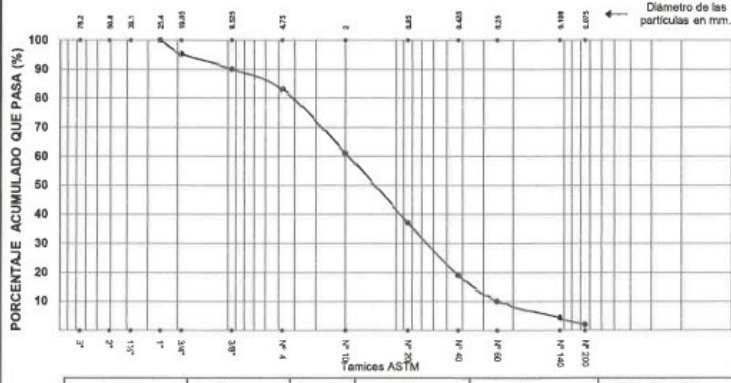


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 249/2019

SOLICITANTE : HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME		
PROYECTO : ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		
UBICACIÓN : QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		Profundidad : 0.65 m.
CALICATA : CA-2		Muestra : MAB
FECHA : La Molina, 30 de diciembre de 2019		Téc. Resp. : M.M.R.
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422		LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318
MALLA	ABERTURA mm.	PORCENTAJE QUE PASA (%)
3"	76.20	
2"	50.80	
1 1/2"	38.10	
1"	25.40	100
3/4"	19.05	95
3/8"	9.525	90
Nº 4	4.750	83
Nº 10	2.000	61
Nº 20	0.850	37
Nº 40	0.425	19
Nº 60	0.250	10
Nº 140	0.106	4
Nº 200	0.075	2
		Límite líquido (%) Límite plástico (%) Índice plástico (%) Límite de contracción (%)
		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3262
		Coefficiente de:
		-Uniformidad 13.52
		-Curvatura 0.54
		Material:
		-Grava % 17
		-Arena % 81
		-Finos % 2
		Clasificación:
		-AASHTO
		-SUCS SP con grava
		Nombre de grupo:
		CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216
		Humedad natural (%) -

CURVA GRANULOMÉTRICA



Gruesa	Fina	Gruesa	Media	Fina	Limos y Arcillas
Grava		Arena		Finos	

OBSERVACIÓN :
NOTA : La Muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante.

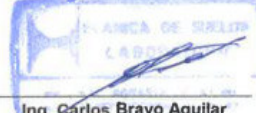

Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

Figura 36. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 2 (CA-2) de la quebrada Cantuta.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 249/2019

SOLICITANTE : HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME
PROYECTO : ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA
UBICACIÓN : QUEBRADA DE SANTO DOMINGO - CHOSICA
ENSAYO : Determinación del Peso Específico
FECHA : 23 de diciembre de 2019

Téc. Resp.: M.M.R.

DETERMINACIÓN DE PESO ESPECÍFICO - NTP 339.131

Calicata : CA-2
Muestra : MAB
Profundidad : 0.65 m

$$Pe = \frac{Wsseco}{Wsseco + (Wfa - Wfas)} : \boxed{2.671}$$



Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

Figura 37. Resultados del ensayo de determinación de peso específico para el punto 2 (CA-2) de la quebrada Cantuta.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 249/2019

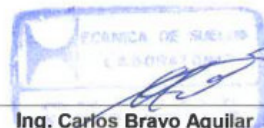
SOLICITANTE : HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME
PROYECTO : ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA
UBICACIÓN : QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA
CALICATA : CA-2
PROFUNDIDAD : 0.65 m
FECHA : La Molina , 20 de diciembre de 2019 **Téc.Resp.:** MMR

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Especimén	:	A	B	C
Lado (cm)	:	6.00	6.00	6.00
Altura (cm)	:	2.544	2.544	2.544
Densidad Seca (gr/cm³)	:	1.520	1.520	1.520
Humedad Inicial (%)	:	0.79	0.79	0.79
Esfuerzo Normal (kg/cm²)	:	0.50	1.00	2.00

Deformación Unitaria (E - %)	Esfuerzo Cortante (kg/cm²)		
0.5	0.10	0.17	0.25
1.0	0.14	0.27	0.30
2.0	0.20	0.43	0.63
3.0	0.23	0.48	0.79
4.0	0.27	0.56	1.00
5.0	0.27	0.60	1.12
6.0	0.29	0.65	1.24
7.0	0.27	0.68	1.24
8.0	0.25	0.67	1.23
9.0	0.22	0.65	1.20
10.0	0.20	0.62	1.15
11.0	0.19	0.60	1.12
13.0	0.17	0.57	1.08
15.0	0.16	0.54	1.05

Ángulo de Fricción Interna del Suelo (°) 32.04
Cohesión Aparente del Suelo (kg/cm²) 0.00



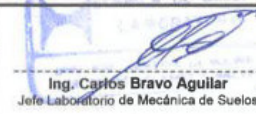
Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

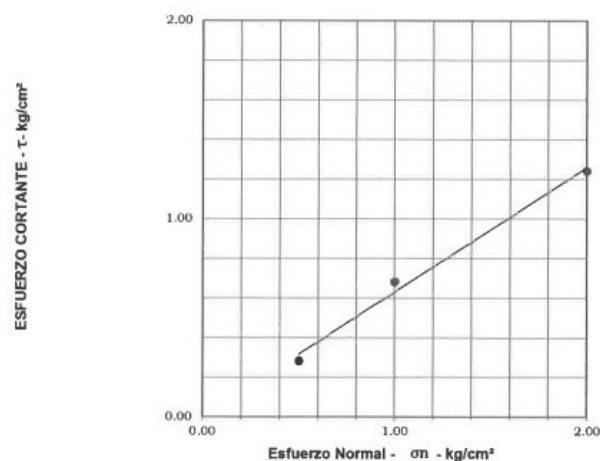
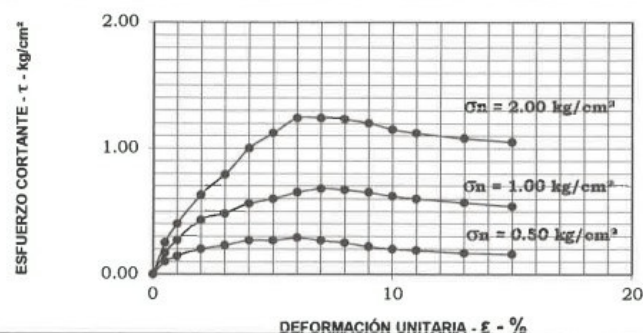
Figura 38. Resultados tabulares del ensayo de corte directo para el punto 2 (CA-2) de la quebrada Cantuta.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 249/2019
ENSAYO DE CORTE DIRECTO ASTM D - 3080

SOLICITANTE :	HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME		
PROYECTO :	ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		
UBICACIÓN :	QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA	Téc. Resp.:	M.M.R.
CALICATA :	CA-2	Fecha:	20-12-19
MUESTRA :	MAB	PROFUNDIDAD	0.65 m
Ángulo de fricción interna del suelo :	32.04 °	 Ing. Carlos Bravo Aguilar Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos	
Cohesión Aparente del suelo :	0.00 kg/cm ²		
Densidad Seca Promedio (vd<N° 4) :	1.52 gr/cm ³		
Humedad Natural (%) :	0.79 %		



Observación : Muestra remoldeada a densidad proporcionada por el solicitante

Figura 39. Resultados gráficos del ensayo de corte directo para el punto 2 (CA-2) de la quebrada Cantuta.

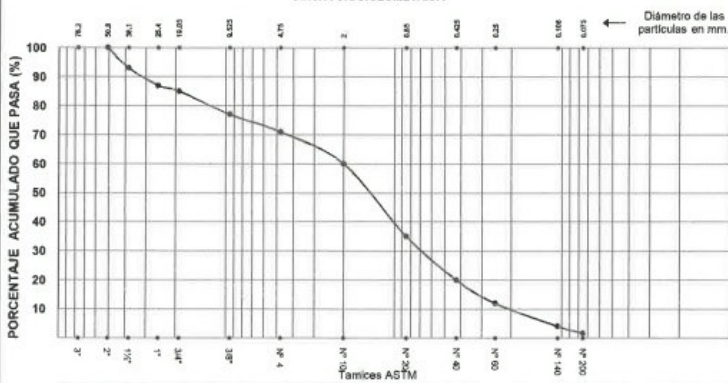


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 248/2019

SOLICITANTE : HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME		
PROYECTO : ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		
UBICACIÓN : QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		Profundidad : 1.05 m.
CALICATA : SD-1		Muestra : MAB
FECHA : La Molina, 30 de diciembre de 2019		Téc. Resp. : M.M.R.
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO		
NTP 339.128 / ASTM - D 422		
MALLA	ABERTURA mm.	PORCENTAJE QUE PASA (%)
3"	76.20	100
2"	50.80	100
1 1/2"	38.10	93
1"	25.40	87
3/4"	19.05	85
3/8"	9.525	77
Nº 4	4.750	71
Nº 10	2.000	60
Nº 20	0.850	35
Nº 40	0.425	20
Nº 60	0.250	12
Nº 140	0.106	4
Nº 200	0.075	2
LÍMITES DE CONSISTENCIA		
ASTM - D 427 / D 4318		
Límite líquido (%)		
Límite plástico (%)		
Índice plástico (%)		
Límite de contracción (%)		
Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282		
Coefficiente de:		
-Uniformidad		17.43
-Curvatura		0.56
Material:		
-Grava	%	29
-Arena	%	69
-Finos	%	2
Clasificación:		
-AASHTO		
-SUCS SP con grava		
Nombre de grupo:		
CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216		
Humedad natural (%)		-

CURVA GRANULOMÉTRICA



Gruesa	Fina	Gruesa	Media	Fina	Limos y Arcillas
Grava		Arena		Finos	

OBSERVACIÓN :
NOTA : La Muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante.

Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

Figura 40. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 1 (SD-1) de la quebrada Santo Domingo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 248/2019

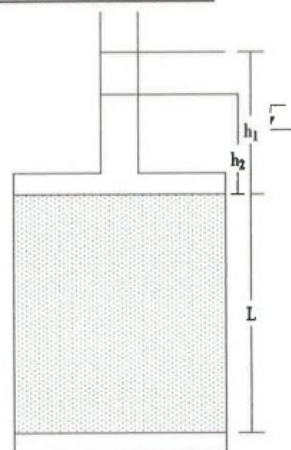
SOLICITANTE	:	HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME	
PROYECTO	:	ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA	
UBICACIÓN	:	QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA	
MUESTRA	:	SD-1	
PROFUNDIDAD	:	1.05 m	
FECHA	:	La Molina, 24 de diciembre de 2019	Téc.Resp.: MMR

ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA CONSTANTE ASTM D2434-68

Fecha de Ensayo	:	23/12/2019
Area de Muestra	:	182.41 cm ²
Diametro de muest	:	15.24 cm
Altura de muestra	:	11.43 cm
Densidad	:	1.62 gr/cm ³

$$K_{20} = QL/ATH$$

$$k_{20} = 1.0198 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$$



Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por solicitante.



Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

Figura 41. Resultados del ensayo de permeabilidad para el punto 1 (SD-1) de la quebrada Santo Domingo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 248/2019

SOLICITANTE : HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME
PROYECTO : ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA
UBICACIÓN : QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA
CALICATA : SD-1
PROFUNDIDAD : 1.05 m
FECHA : La Molina , 20 de diciembre de 2019 **Téc.Resp.:** MMR

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Especimén	:	A	B	C
Lado (cm)	:	6.00	6.00	6.00
Altura (cm)	:	2.544	2.544	2.544
Densidad Seca (gr/cm³)	:	1.540	1.540	1.540
Humedad Inicial (%)	:	0.67	0.67	0.67
Esfuerzo Normal (kg/cm²)	:	0.50	1.00	2.00
Deformación Unitaria		Esfuerzo Cortante		
(E - %)		(kg/cm²)		
0.5		0.09	0.16	0.23
1.0		0.13	0.25	0.30
2.0		0.17	0.39	0.58
3.0		0.24	0.45	0.70
4.0		0.29	0.54	0.90
5.0		0.30	0.59	1.09
6.0		0.31	0.63	1.18
7.0		0.30	0.65	1.23
8.0		0.27	0.64	1.26
9.0		0.23	0.61	1.22
10.0		0.21	0.57	1.19
11.0		0.18	0.55	1.16
13.0		0.17	0.53	1.14
15.0		0.15	0.50	1.11

Ángulo de Fricción Interna del Suelo (°)
Cohesión Aparente del Suelo (kg/cm²)

32.11
0.00



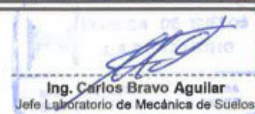
Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

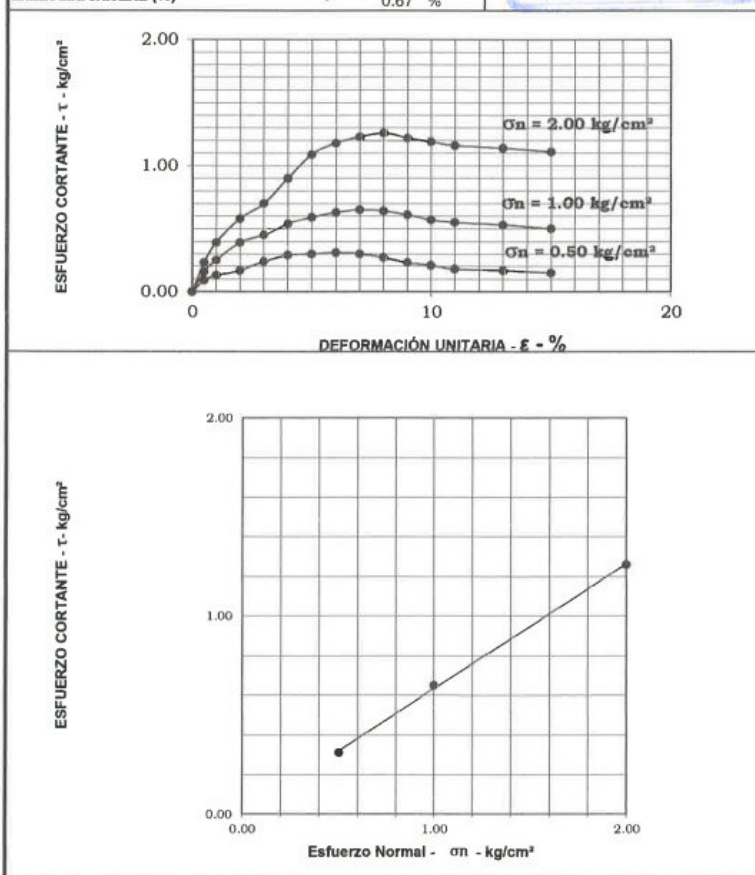
Figura 42. Resultados tabulares del ensayo de corte directo para el punto 1 (SD-1) de la quebrada Santo Domingo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 248/2019
ENSAYO DE CORTE DIRECTO ASTM D - 3080

SOLICITANTE :	HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME		
PROYECTO :	ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		
UBICACIÓN :	QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA	Téc. Resp.:	M.M.R.
CALICATA :	SD-1	Fecha:	20-12-19
MUESTRA :	MAB	PROFUNDIDAD	1.05 m
Ángulo de fricción interna del suelo :	32.11 °	 Ing. Carlos Bravo Aguilar Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos	
Cohesión Aparente del suelo :	0.00 kg/cm ²		
Densidad Seca Promedio (γ _d -N° 4) :	1.54 gr/cm ³		
Humedad Natural (%) :	0.67 %		



Observación : Muestra remoldeada a densidad proporcionada por el solicitante

Figura 43. Resultados gráficos del ensayo de corte directo para el punto 1 (SD-1) de la quebrada Santo Domingo.

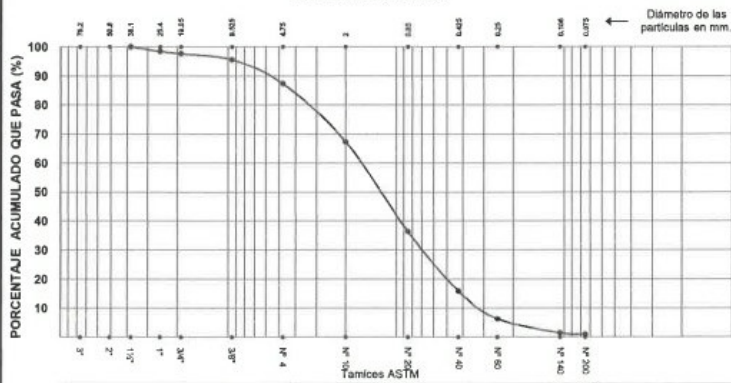


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
Laboratorio de Mecánica de Suelos

INFORME DOT.C - LMS - 248/2019

SOLICITANTE : HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME		
PROYECTO : ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		
UBICACIÓN : QUEBRADA SANTO DOMINGO - CHOSICA		Profundidad : 0.95 m.
CALICATA : SD-2		Muestra : MAB
FECHA : La Molina, 30 de diciembre de 2019		Téc. Resp. : M.M.R.
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO		LÍMITES DE CONSISTENCIA
NTP 339.128 / ASTM - D 422		ASTM - D 427 / D 4318
MALLA	ABERTURA mm.	QUE PASA (%)
3"	76.20	
2"	50.80	
1 1/2"	38.10	100
1"	25.40	98
3/4"	19.05	98
3/8"	9.525	96
Nº 4	4.750	87
Nº 10	2.000	67
Nº 20	0.850	36
Nº 40	0.425	16
Nº 60	0.250	6
Nº 140	0.106	1
Nº 200	0.075	1
		Límite líquido (%)
		Límite plástico (%)
		Índice plástico (%)
		Límite de contracción (%)
Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282		
Coefficiente de:		
-Uniformidad		10.35
-Curvatura		0.49
Material:		
-Grava		% 13
-Arena		% 86
-Finos		% 1
Clasificación:		
-AASHTO		
-SUCS		SP
Nombre de grupo:		
CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216		
Humedad natural (%)		-

CURVA GRANULOMÉTRICA



Gruesa	Fina	Gruesa	Media	Fina	Limos y Arcillas
Grava		Arena		Finos	

OBSERVACIÓN :
NOTA : La Muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante.

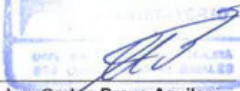

Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

Figura 44. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 2 (SD-2) de la quebrada Santo Domingo.

9.3 Panel fotográfico



Figura 45. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Puntos de interés con registro fotográfico.



Figura 46. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Puntos de control geodésico tomado en campo SD1.

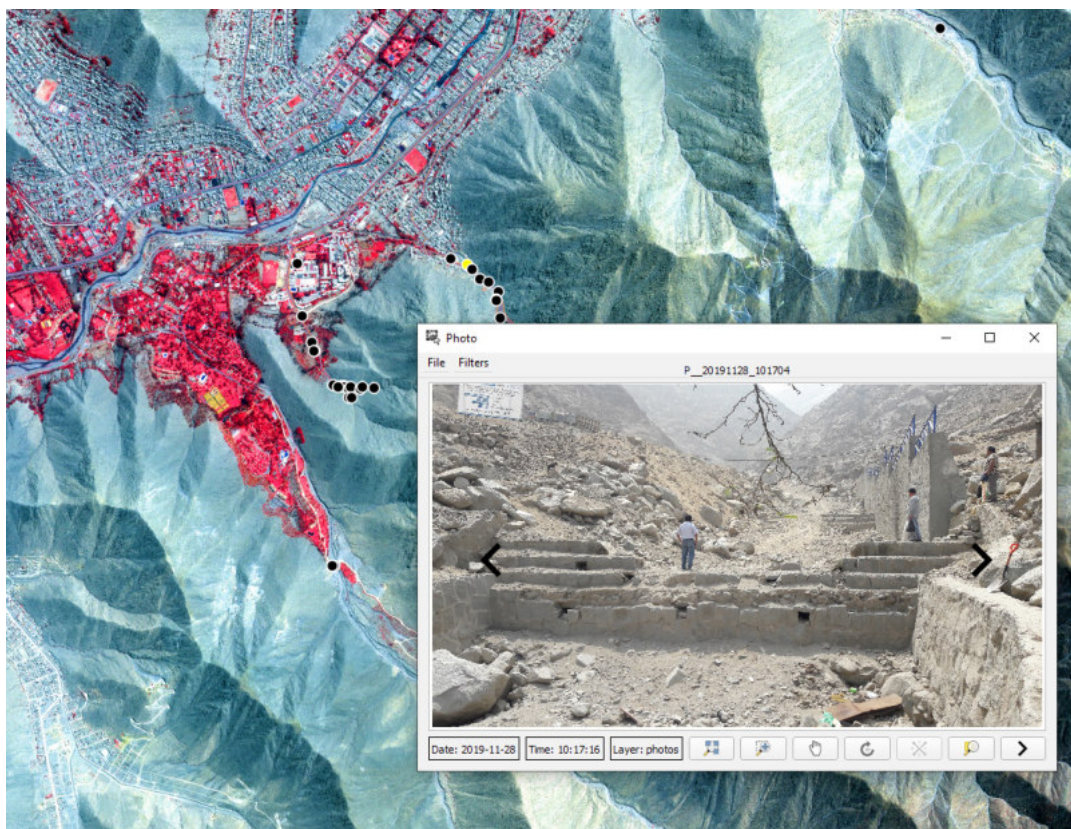


Figura 47. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Barraje colapsado y muro de contención lateral.



Figura 48. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Barraje colmado de sedimentos y muro de contención lateral.

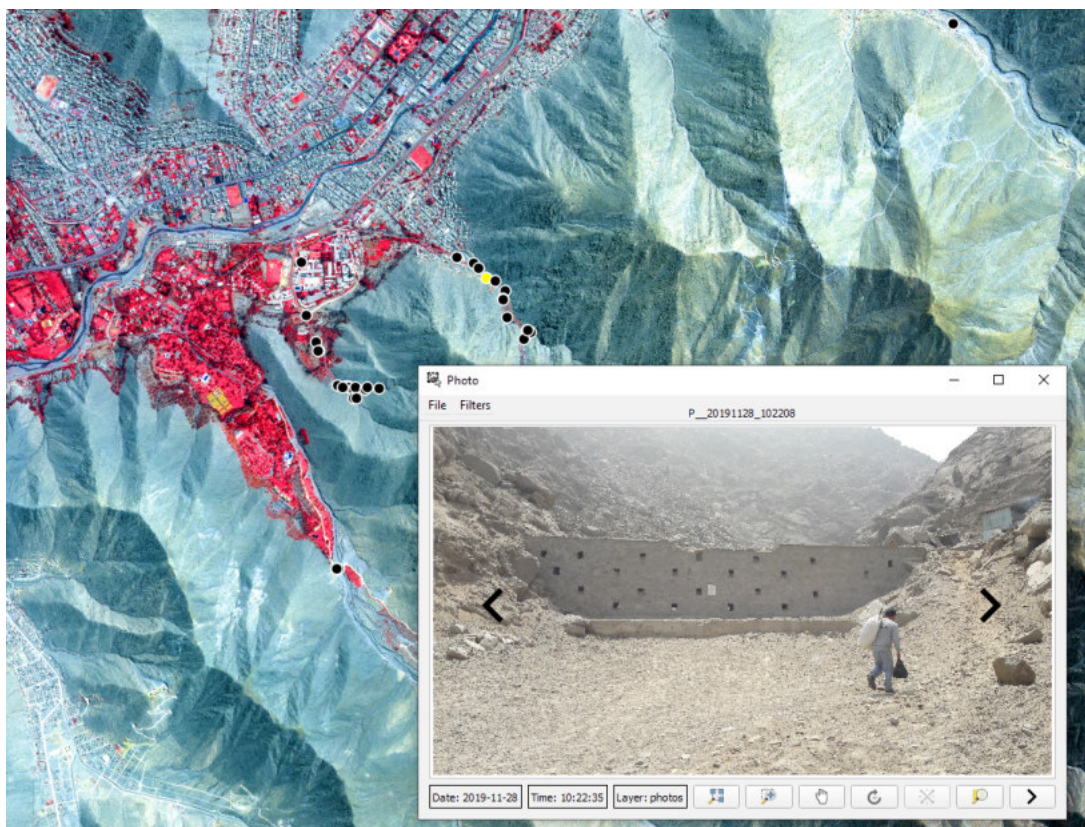


Figura 49. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Presa de control de sedimentos.

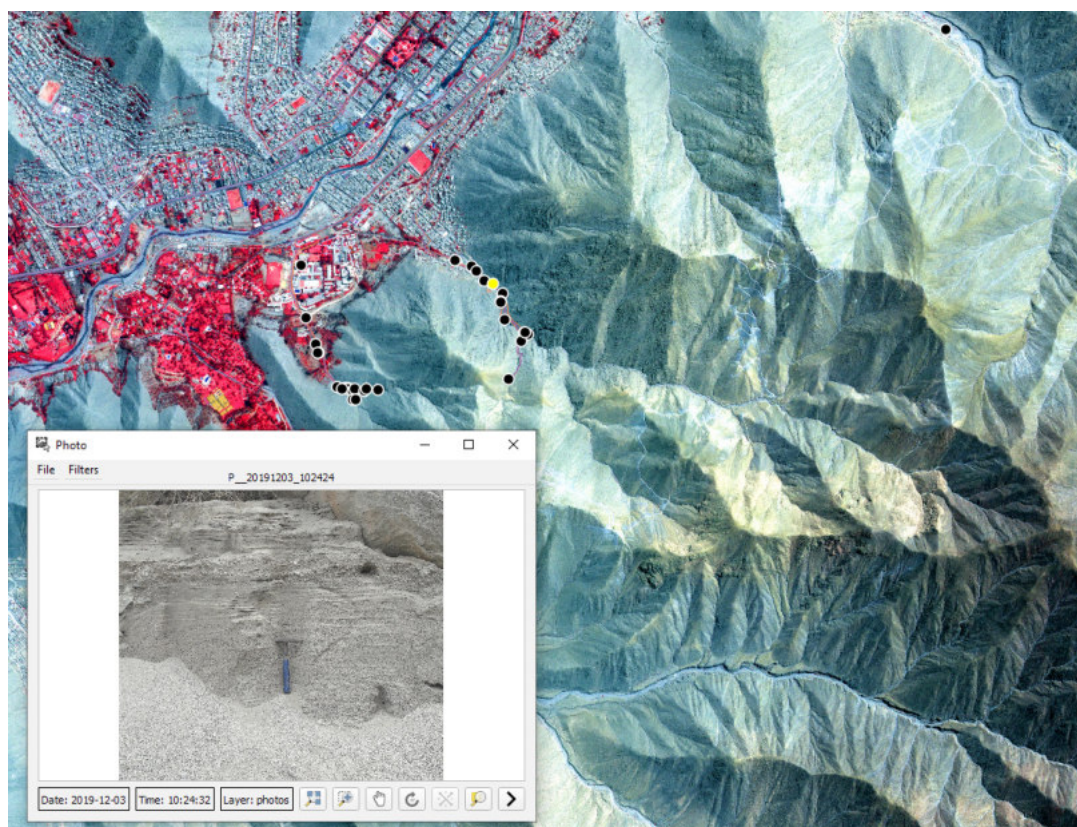


Figura 50. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil en donde se puede observar laminaciones relacionados con eventos diferentes.

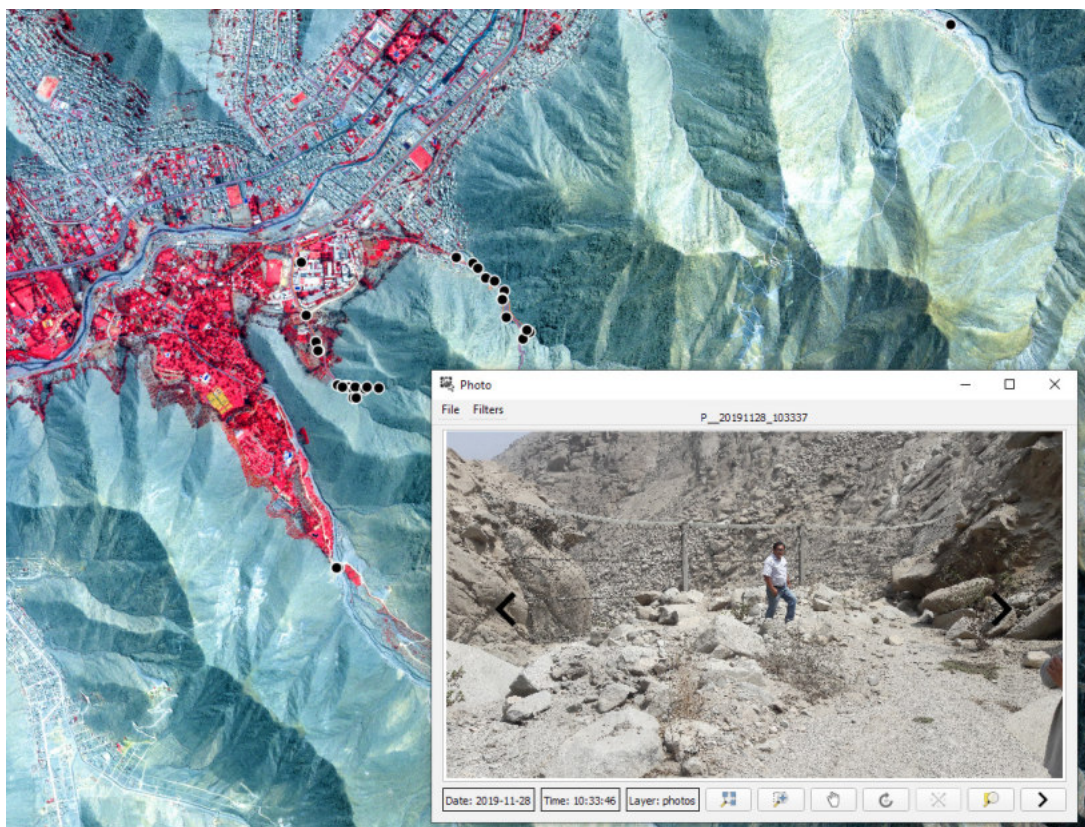


Figura 51. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Geomalla para el control de sedimentos.

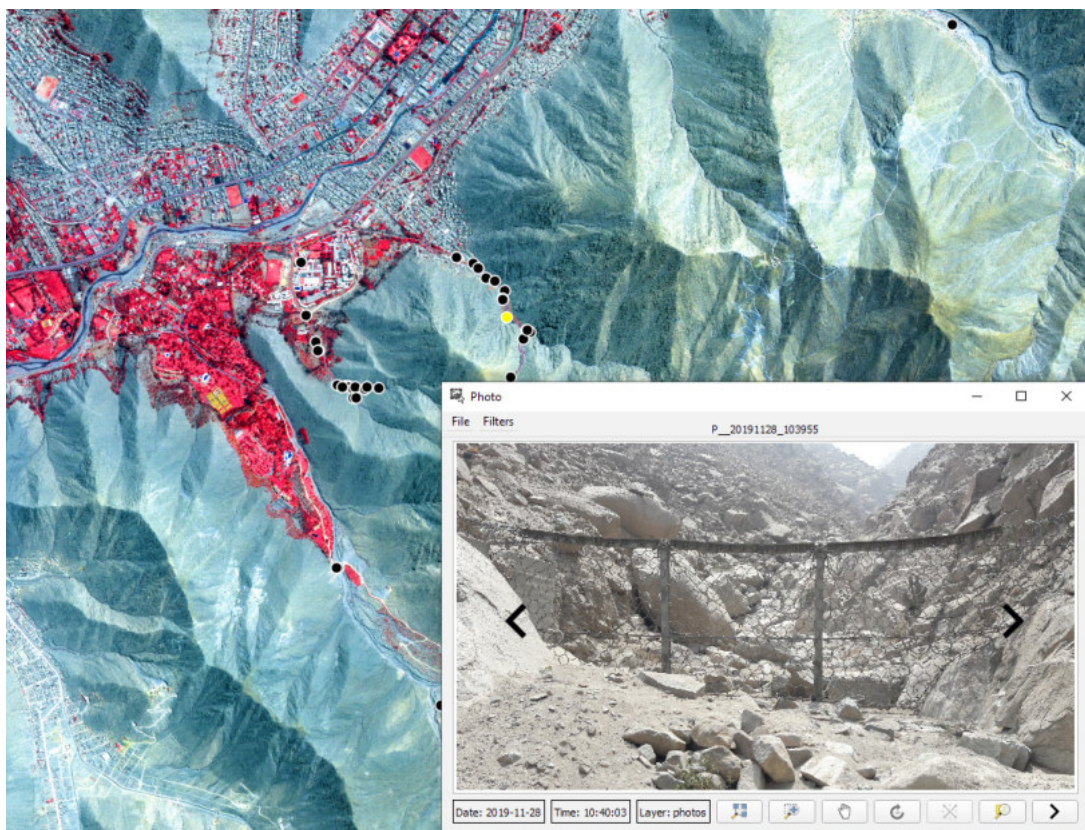


Figura 52. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Geomalla para el control de sedimentos.

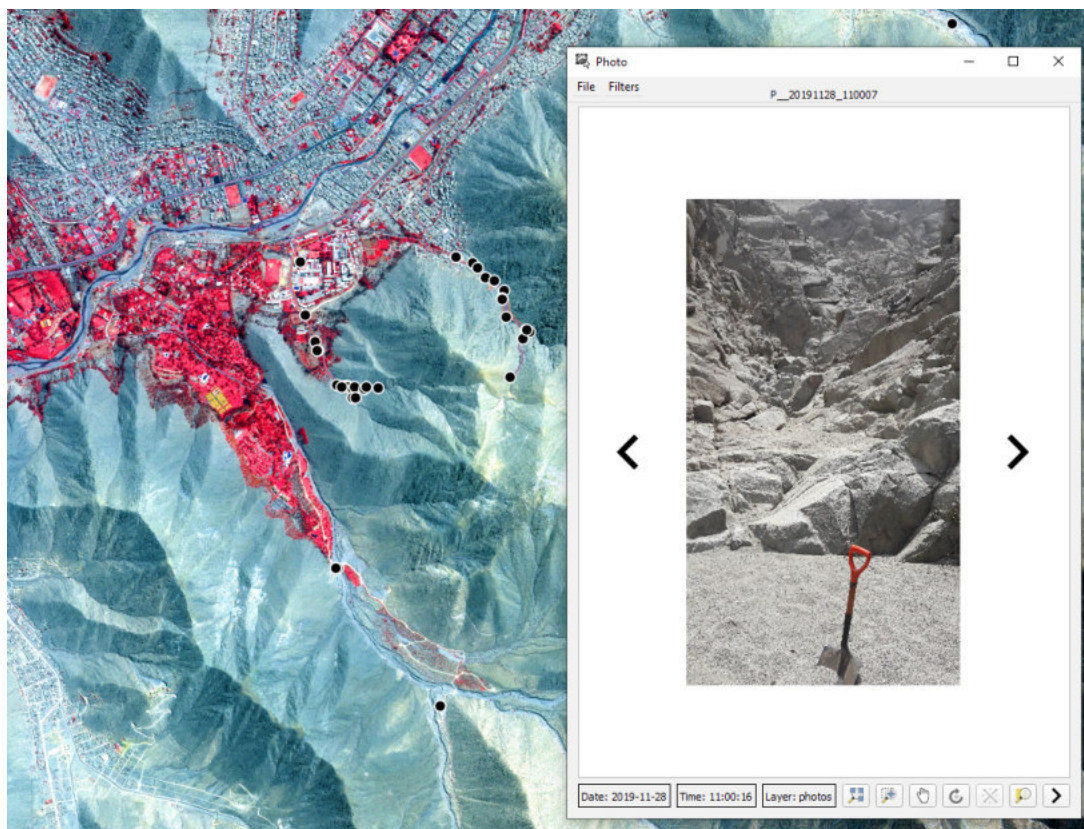


Figura 53. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Depósito de sedimentos en el cauce con predominancia de arenas.

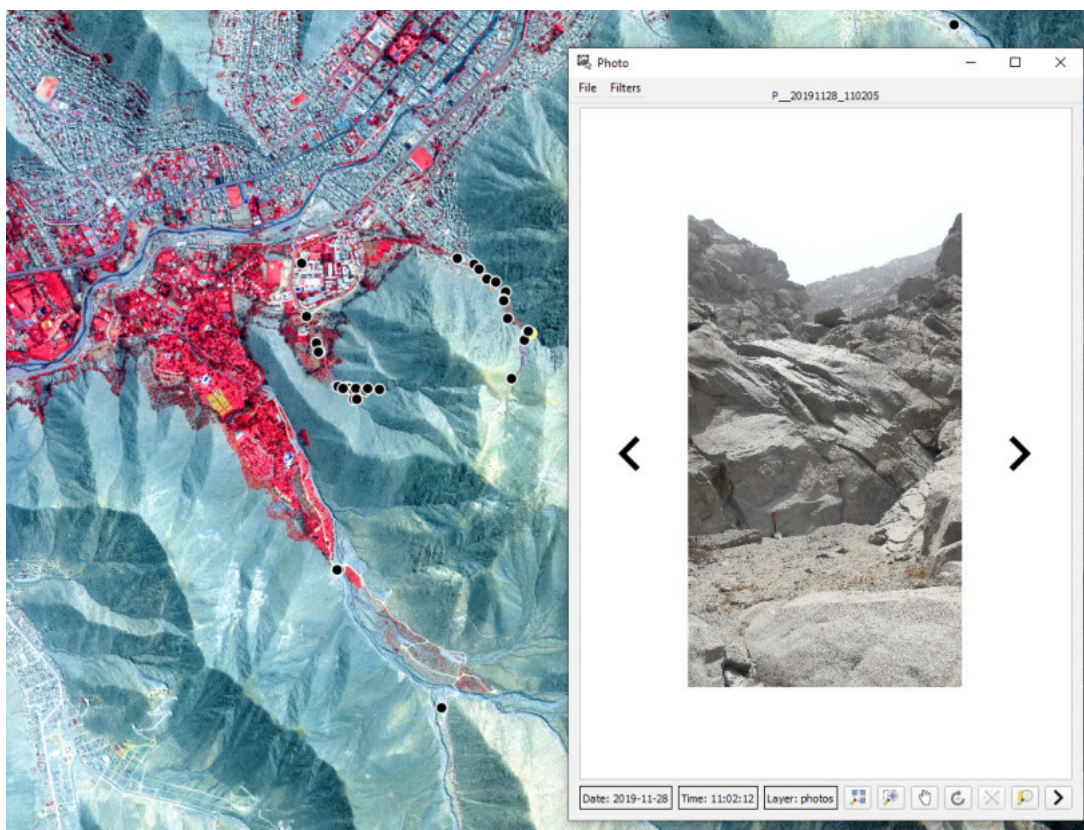


Figura 54. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Basamento rocoso expuesto en el cauce y caída natural.

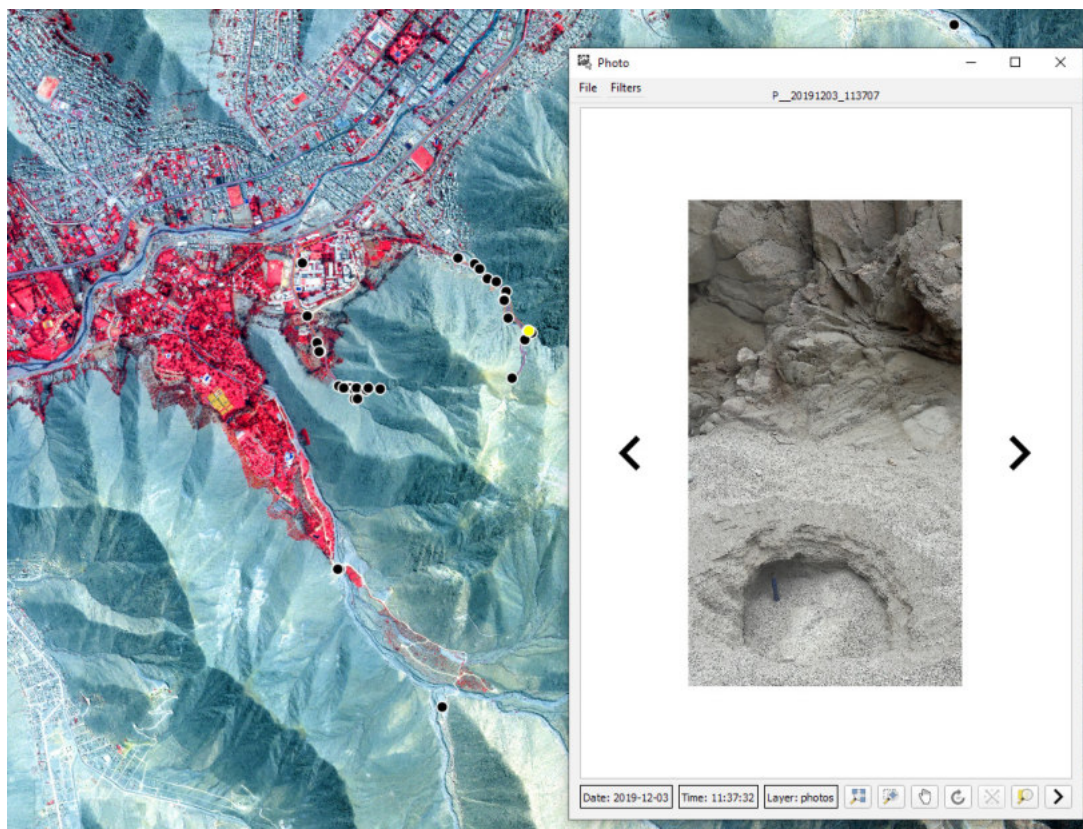


Figura 55. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata en el cauce SD2.

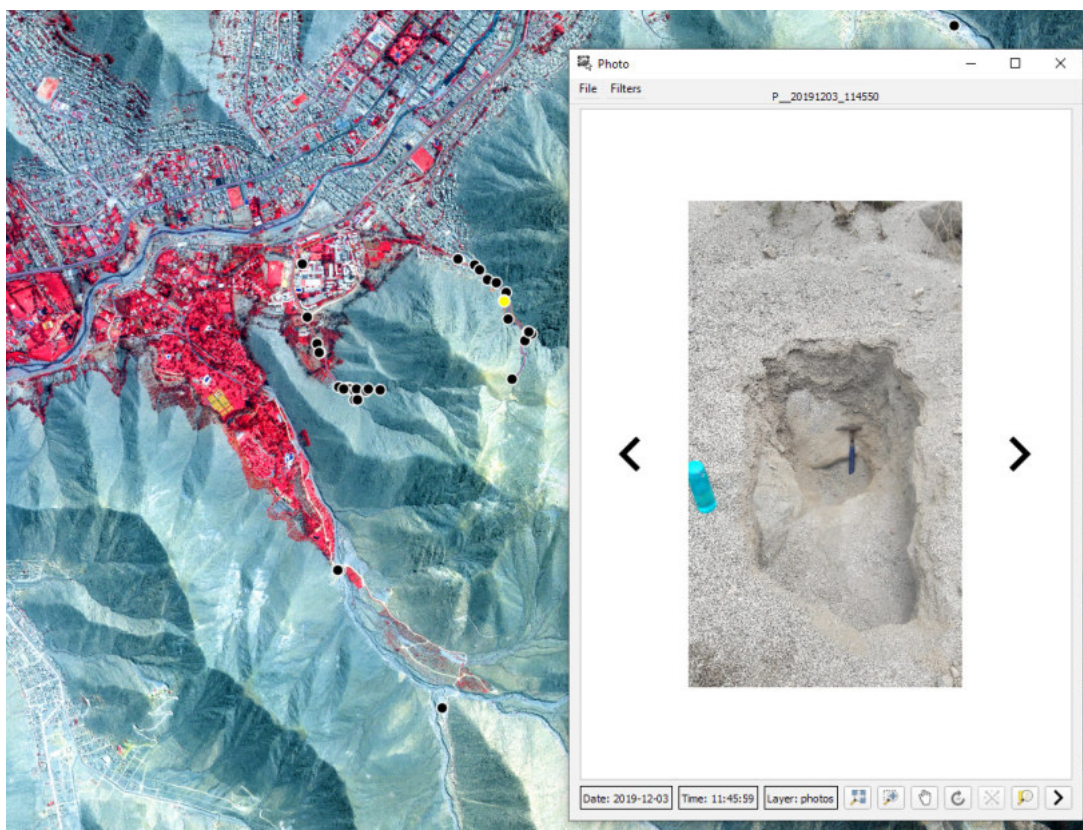


Figura 56. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata en el cauce SD1.

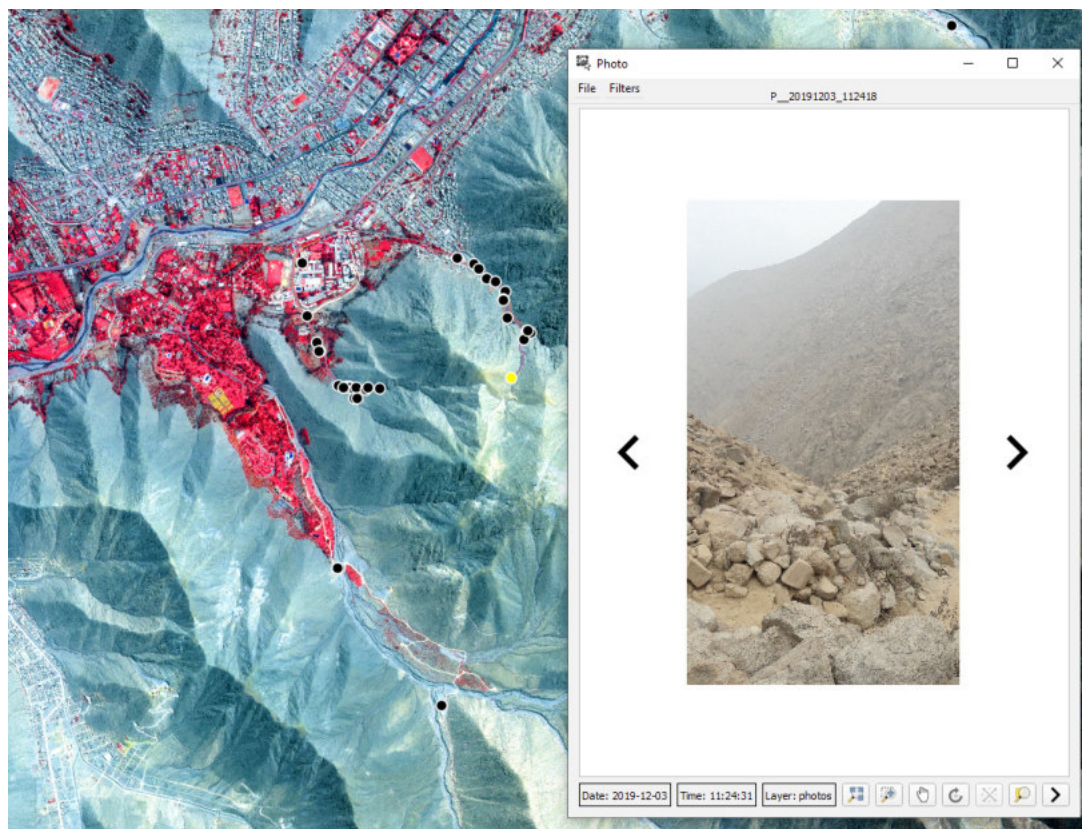


Figura 57. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Talud en afluente de margen izquierda.

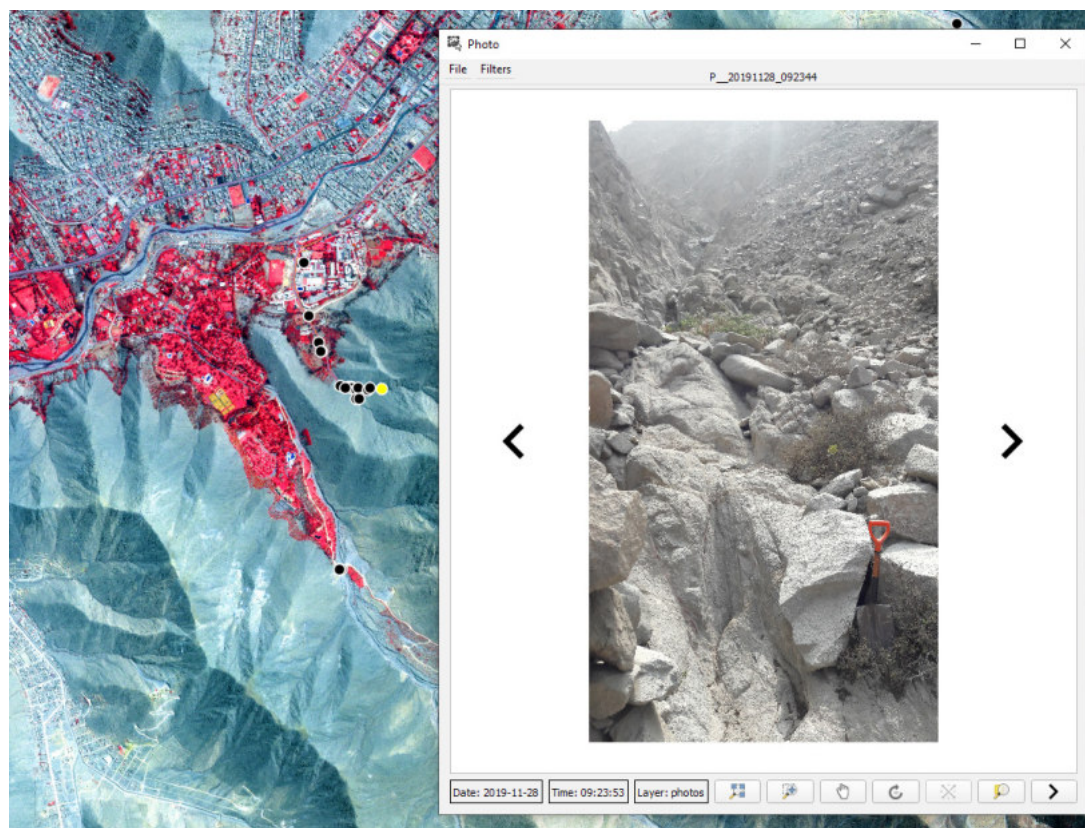


Figura 58. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Cauce principal con elementos macrorrugosos.

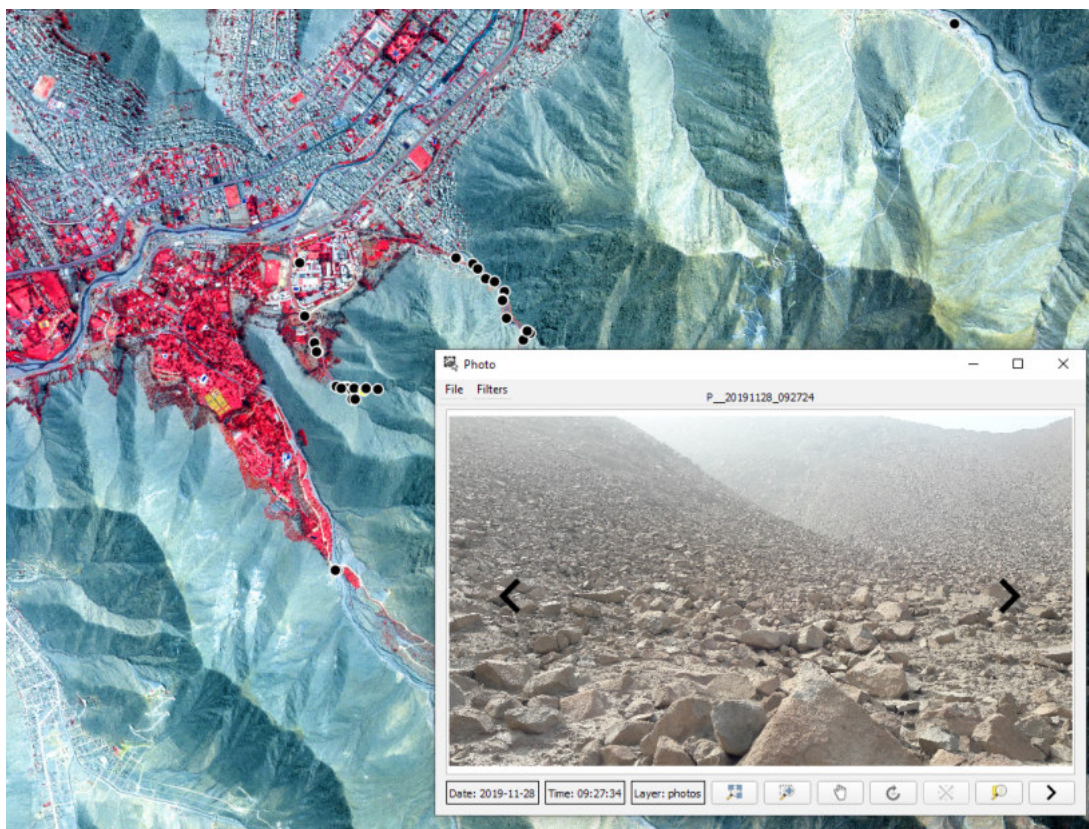


Figura 59. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Predominancia de depósitos sedimentarios coluviales.

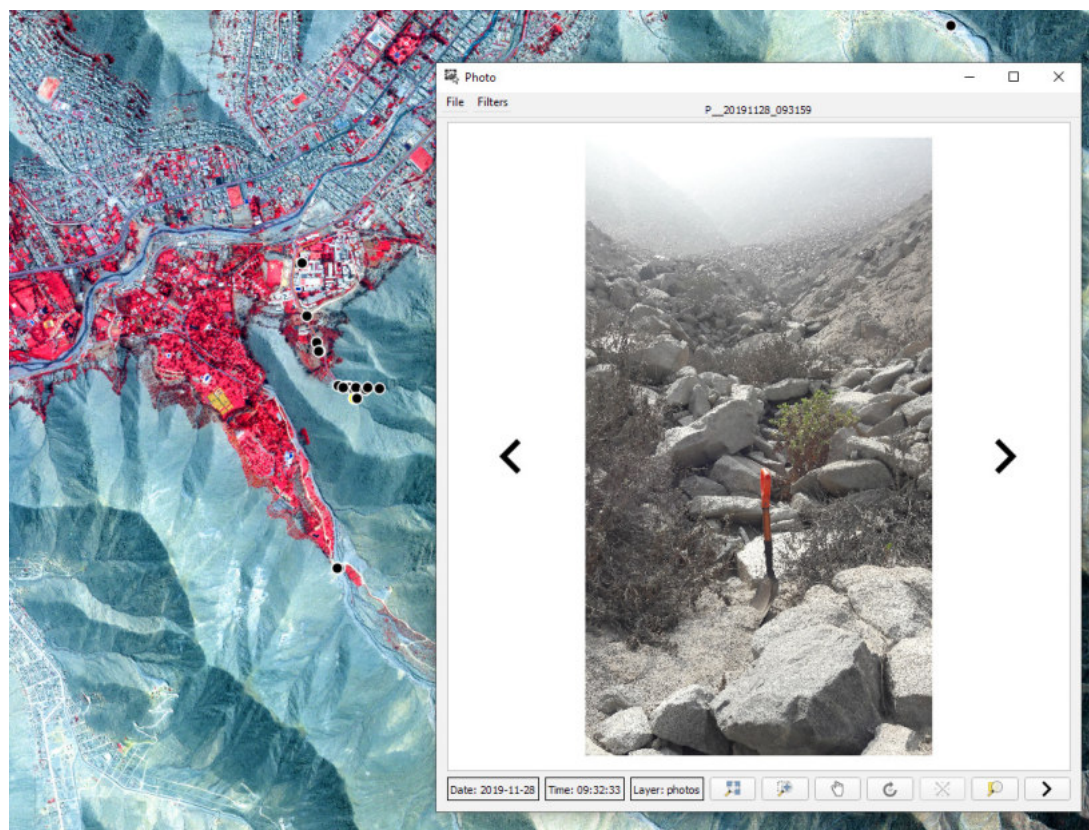


Figura 60. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Elementos macro rugosos en el cauce principal.

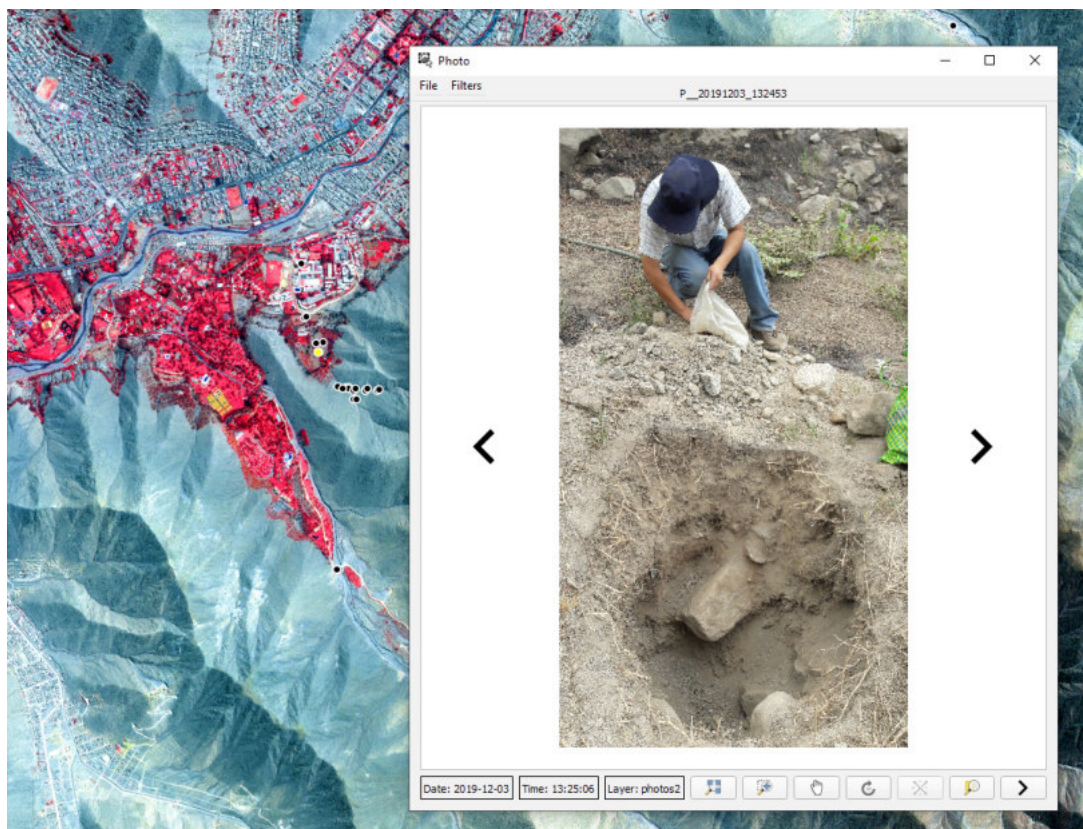


Figura 61. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata CA1.

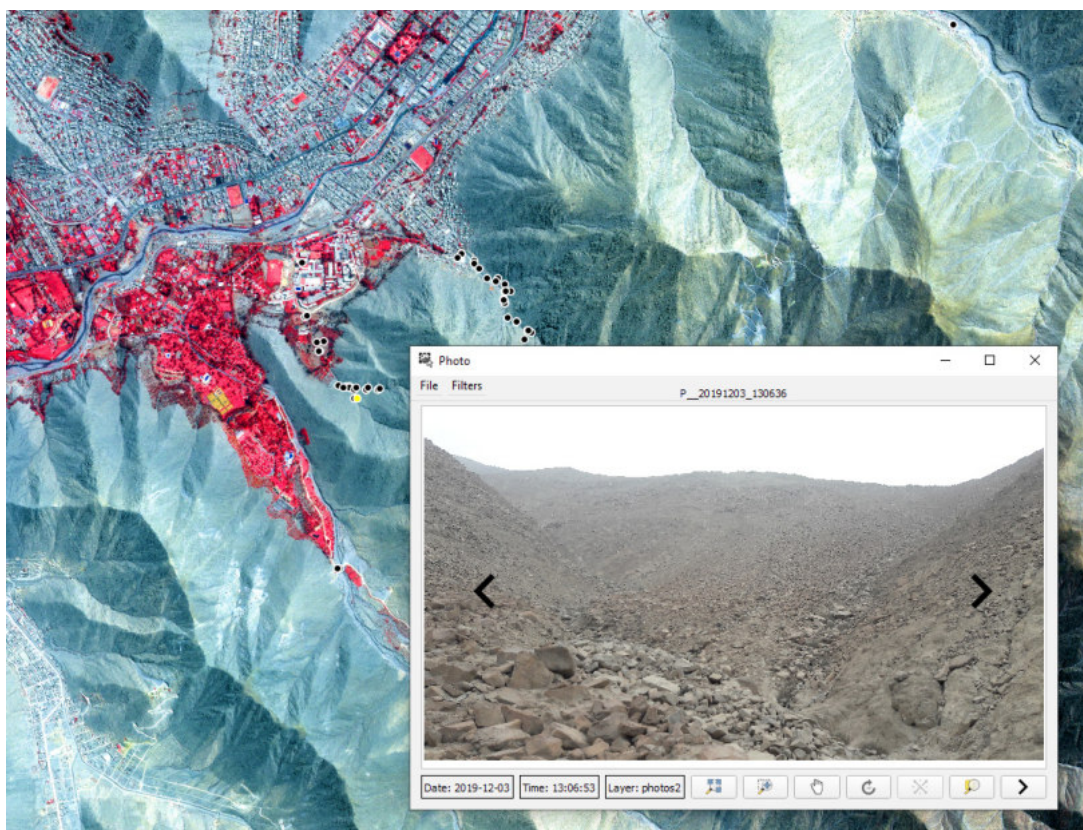


Figura 62. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Depósitos sedimentarios coluviales.

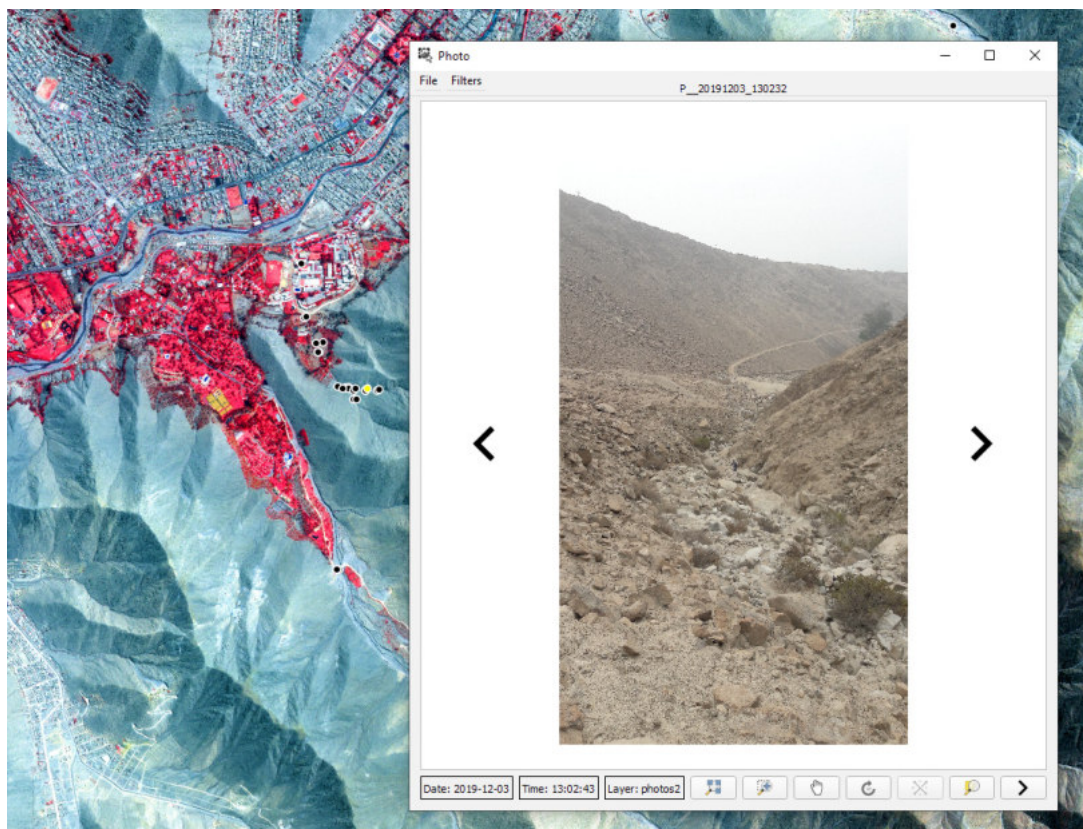


Figura 63. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Cauce con elementos marco rugosos expuestos.

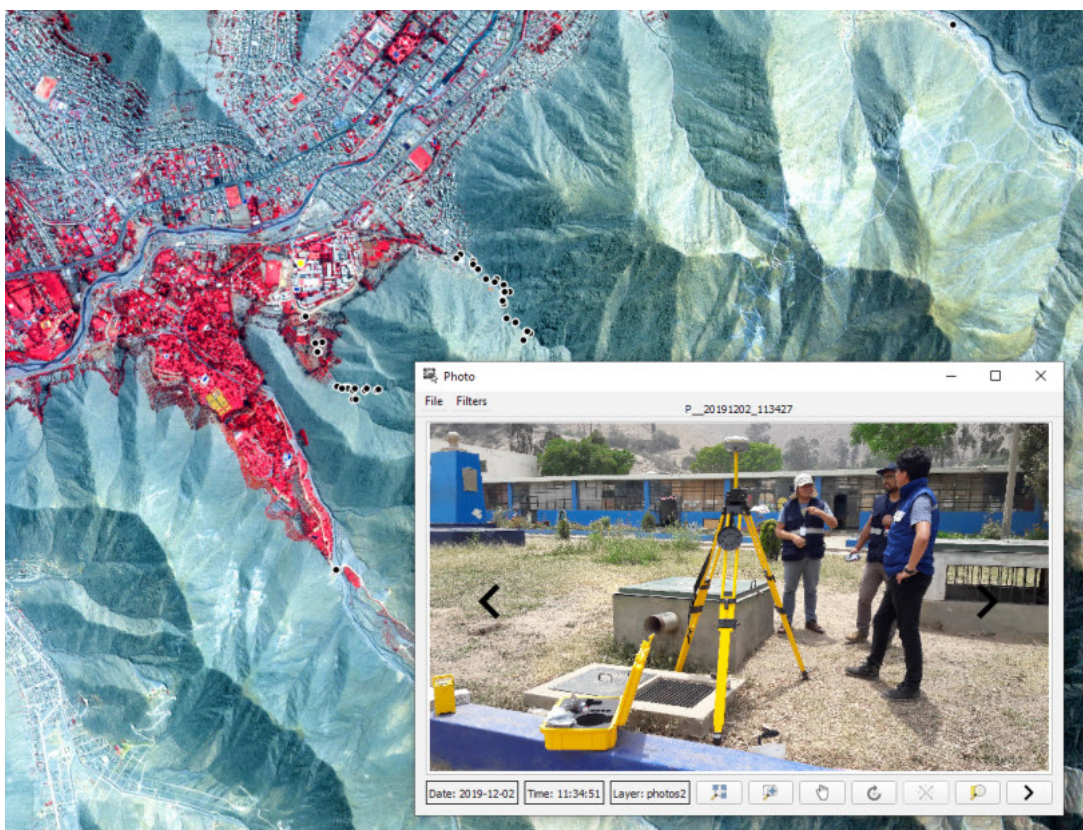


Figura 64. Microcuenca Santo Domingo y Cantuta. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Cauce con elementos marco rugosos expuestos.



Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
Dirección General de Hidrología



Jr. Cahuide 785, Jesús María - Lima



Cen tral telefónica (511) 614-1414



www.senamhi.gob.pe

